



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU KETTUNEN  
BETONIN KEMIKAALIKESTÄVYYS JA SUOJAAMINEN KEMIKAALILTA  
TEOLLISUUSRAKENTAMISESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
3. tammikuuta 2018  
Talouden ja rakentamisen tiedekunta

## TIIVISTELMÄ

**TEEMU KETTUNEN:** Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen kemikaaleilta teollisuusrakentamisessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 113 sivua, 27 liitesivua

Kesäkuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Matti Pentti

**Avainsanat:** betoni, kemiallinen kestävyys, kemikaalikestävyys, käyttöikä, sementti, sideaine, pinnoite

Diplomityössä käsitellään betonin kemiallista kestävyyttä ja erityisesti kemikaalikestävyyttä. Tarkasteltavia kemikaaleja ovat sekä luonnossa esiintyvät yhdisteet että teollisuudessa käytettävät voimakkaat kemikaalit. Työ pyrkii huomioimaan erityisesti teollisuuden kohteissa vallitsevat rasitukset, sillä aihepiiristä ei ole paljoa tietoa tarjolla. Työssä käsitellään kemikaaleja kategorioituina erilaisiin ryhmiin, kuten happoihin, eikä työssä käsitellä tietyn yksittäisen kemikaalin aiheuttamaa rasitusta, muutaman voimakkaasti aggressiivisen kemikaalin vauriomekanismin kuvailua lukuun ottamatta.

Betonin kemikaalikestävyys on monimutkainen kokonaisuus, joka perustuu kemiallisiin reaktioihin vaikuttavan kemikaalin ja betonin sideaineen, usein sementin, kanssa. Betonin kemikaalikestävyyden ymmärtämiseen tarvitaan sementtikemian ilmiöiden osaamista. Sementtikemia tarkastelee sementin koostumuksen ja hydrataation kulkua sekä siihen kohdistuvien kemiallisten reaktioiden syitä ja seurauksia. Sementtikemiaa käsitellään työssä suppeana versiona.

Betonin kemialliset reaktiot erilaisten kemikaalien kanssa riippuvat vaikuttavan kemikaalin koostumuksesta, sen väkevyydestä, pH:sta, lämpötilasta, mahdollisesta virtauksesta sekä jaksottaisesta kastumisesta ja kuivumisesta. Betonin koostumus vaikuttaa betonin reaktioihin erilaisten kemikaalien kanssa ja oikealla koostumuksella pystytään usein varmistamaan betonin kemikaalinkesto. Oikea koostumus on monen asian kokonaisuus, mistä tärkeimpiä ovat vesi-sementtisuhde, käytettävän sideaineen koostumus sekä käytettävät lisäaineet. Betonin kemiallisen kestävyuden tärkein ominaisuus on tiivis ja ehjä betonipinta, joka estää haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin. Pinnan ollessa tiivis, haitalliset aineet eivät pääse vahingoittamaan sementin hydrataatiotuotteita helposti ja niiden tunkeutuminen syvälle betoniin on tiiviissä betonissa hidasta.

Kaikkein aggressiivisimmat kemikaalit tuhoavat betonin pinnan mikrorakennetta ollessa kosketuksessa sen kanssa, jolloin betonin koostumuksella ei voida saavuttaa haluttua kemikaalinkestoa. Tällöin betonirakenne tulee pinnoittaa kemikaalia kestävällä pinnoitteella. Pinnoitteita on lukuisia erilaisia ja niillä kaikilla on omat ominaisuutensa. Koska pinnoitteilla ei ole standardoituja ominaisuuksia, joita tulisi noudattaa, työssä esitellään pinnoitteiden ominaisuuksia sekä eri pinnoitemateriaaleja, mutta ei oteta kantaa kemialliseen, mekaaniseen tai fysikaaliseen kestävyyskriteeriin yksityiskohtaisesti. Valittaessa kemikaalia kestävä pinnoite, valinta tulee tehdä aina yhteistyössä pinnoitteen valmistajan kanssa.

## ABSTRACT

**TEEMU KETTUNEN:** Concrete chemical durability and protection from chemicals in industrial construction

Master of Science Thesis, 113 pages, 27 Appendix pages

June 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** concrete, chemical durability, working life, cement, binder, coating

This Master's thesis discusses concrete chemical durability and especially durability against chemicals in industrial environment. Studied chemicals include both naturally occurring chemicals and chemicals native to industrial facilities. Study focuses on chemicals used by the industrial facilities since there is a limited amount of knowledge available about the subject. Rather than inspecting specific chemicals, with the exception of a few very aggressive ones, this study focuses on chemicals categorized into general groups such as acids.

Concrete chemical durability is a complex subject which is based on chemical reactions between aggressive chemical and concrete binder, usually being cement. In order to understand concrete chemical durability, understanding cement chemistry is required. Cement chemistry is a science about cement composition and hydration as well as chemical reactions between cement and other materials. The study introduces basics of cement chemistry and does not discuss it in-depth.

Chemical reactions of concrete with different kinds of chemicals depend on composition and concentration of the chemical, temperature, whether fluid is flowing or not as well as cyclic wetting-drying. Concrete's composition effects chemical reactions between concrete and different chemicals and harmful chemical reactions can often be avoided by choosing right composition. Right composition consists of multiple points, of which the most important ones are water-cement ratio, composition of binder and admixtures. The most important point about concrete chemical durability is tight and unbroken concrete surface, which prevents detrimental chemicals from penetrating the surface. While the concrete surface has high impermeability, detrimental chemicals are unable to damage the hydration products and their advance deeper into concrete is slowed.

The most aggressive chemicals destroy concrete surface's microstructure when in contact with the surface. With these chemicals it is impossible to get enough good chemical durability and the only option is to use a suitable coating. There are numerous concrete coatings and each of them have their own unique properties. Since there are no standardized properties for concrete coatings, this study describes different properties of coatings and different coating materials, but it does not analyse chemical, mechanical or physical properties of coatings. While choosing chemically durable coating, it is recommended to do so together with a concrete manufacturer.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Tampereen Teknillisen Yliopiston rakennustekniikan laitoksen tutkinto-ohjelmaa. Diplomityölle aiheen on antanut Pöyry Finland Oy kiinnostuksesta teollisuusrakentamisessa vaikuttaviin kemiallisiin rasituksiin. Diplomityö käsittelee betonin kemiallista kestävyyttä erityisesti teollisuusrakentamisen kohteissa, joissa vaikuttavat monet kemikaalit, joita ei esiinny luonnollisesti. Diplomityön ohjaajana Pöyryllä on toiminut DI Aleksi Leminen ja Tampereen Teknillisellä Yliopistolla professori Matti Pentti. Haluan kiittää molempia kommentteista ja ohjauksesta työn kokonaisuuden rakentamisessa, tarkentamisessa sekä viimeistelyssä. Diplomityö on tehty joulukuun 2017 ja toukokuun 2018 välisenä aikana.

Haluaisin kiittää vanhempiani Maunoa ja Irmaa tuesta ja kannustuksesta vuosia kestäneen opiskelutaipaleeni varrella. Ilman heidän kannustusta ja mielipiteitään en olisi välttämättä edes hakenut opiskelemaan ylempään korkeakoulututkintoon.

Kiitokset opiskelukavereilleni, joiden kanssa kursseilla käsiteltäviä asioita pystyi käsittelemään opiskelujeni varrella ymmärryksen parantamiseksi. Haluaisin kiittää Reettaa motivaatiosta opiskelujeni viimeisten vuosien aikana sekä kannustuksesta diplomityön tekemisessä. Erityinen kiitos kaikille ystäville, joiden kanssa olen pystynyt rentoutumaan ja nauttimaan vapaa-ajasta opiskelun vastapainona. Jotkut heistä ovat todellisia herrasmiehiä.

Tampereella, 23.05.2018

Teemu Kettunen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	BETONIN KOOSTUMUS, OMINAISUUDET JA MIKRORAKENNE .....	3
2.1	Sementti .....	4
2.1.1	Portlandsementin hydrataatio .....	6
2.1.2	C-S-H-geeli.....	11
2.1.3	Ettringiitti .....	12
2.1.4	Sementtityypit.....	13
2.2	Kiviaines .....	15
2.3	Vesi.....	16
2.4	Seosaineet.....	16
2.4.1	Lentotuhka.....	18
2.4.2	Masuunikuona.....	21
2.4.3	Silika .....	23
2.5	Lisäaineet .....	25
2.6	Betonin huokosrakenne.....	25
2.6.1	Huokosvesi .....	27
2.7	Betonin lujuus- ja tiiviysominaisuudet .....	28
2.7.1	Betonin läpäisevyys .....	29
3.	BETONIA KEMIALLISTESTI RASITTAVAT REAKTIOT SEKÄ KEMIKAALIEN RASITUKSET .....	31
3.1	Alkali-kiviainesreaktio.....	33
3.2	Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen.....	34
3.3	Hapot.....	37
3.3.1	Orgaaniset hapot .....	39
3.3.2	Epäorgaaniset hapot .....	42
3.4	Kasvisöljyt ja -rasvat sekä eläinöljyt ja -rasvat .....	43
3.5	Emäkset.....	43
3.6	Kloridit .....	44
3.7	Sulfaatit .....	46
3.7.1	Thaumasiitti.....	49
3.8	Veden kemikaalirasitukset .....	50
3.9	Maaöljyt .....	52
3.10	Kaasut .....	53
4.	BETONIN KEMIALLISEN RASITUKSEN VAURIOMEKANISMIT SEKÄ VAURIOIUTUMISEN ESTÄMINEN JA HALLINTA .....	54
4.1	Karbonatisoituminen.....	54
4.2	Betoniterästen korroosio .....	56
4.3	Betonin liukeneminen.....	59
4.4	Ioninvaihto .....	60
4.5	Betonin tilavuudenmuutokset.....	61
4.6	Biologinen korroosio .....	62

4.7	Betonipinnan kuluminen .....	63
4.8	Korkea lämpötila .....	64
4.9	Halkeamat .....	65
5.	BETONIN SUOJAAMINEN KEMIKAALEILTA .....	70
5.1	Sementin koostumus .....	70
5.2	Betonin pinnoittaminen .....	71
5.2.1	Pinnoitetyypit .....	78
5.2.2	Pinnoitteen valinta .....	80
5.2.3	Pinnoitettavan alustan ominaisuudet .....	82
5.3	Betonin saumakohtien kemikaalikestävyys .....	85
5.4	Uhrautuva betonikerros .....	86
6.	BETONIN KÄYTTÖIKÄSUUNNITTELU .....	88
6.1	Betonin käyttöikäsuunnittelun erikoispiirteet kemikaalien rasittamassa ympäristössä .....	96
7.	KEMIALLISEN RASITUKSEN VAURIOITTAMAN BETONIN KORJAAMINEN .....	101
7.1	Korjaustavat ja korjausperiaatteet .....	101
7.2	Halkeamien korjaaminen .....	102
8.	YHTEENVETO .....	104
	LÄHTEET .....	107

LIITE A: BETONIRAKENTEIDEN KÄYTTÖIKÄSUUNNITTELUOHJE JA KEMIKAALIEN RASITUKSET

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	sementtikemian lyhenne alumiinioksidille ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
C	sementtikemian lyhenne kalkille ( $\text{CaO}$ )
CH	sementtikemian lyhenne kalsiumhydroksidille ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )
F	sementtikemian lyhenne rautaoksidille ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
H	sementtikemian lyhenne vedelle ( $\text{H}_2\text{O}$ )
S	sementtikemian lyhenne piioksidille ( $\text{SiO}_2$ )
$\bar{\text{S}}$	sementtikemian lyhenne rikkiatrioksidille ( $\text{SO}_3$ )
$\text{C}_2\text{S}$	beliitti, dikalsiumsilikaatti $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
$\text{C}_3\text{A}$	aluminaatti, trikalsiumaluminaatti $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{C}_3\text{S}$	aliitti, trikalsiumsilikaatti $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
$\text{C}_4\text{AF}$	ferriitti, tetrakalsiumaluminaattiferriitti $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
$\text{SO}_3$	rikkitrioksidi, käytetään myös kuvaamaan sulfaattipitoisuutta
CE-merkintä	ransk. Conformité Européenne, tuota täyttää EU:n direktiivien laatuvaatimukset
C-S-H	sementin hydrataatiossa $\text{C}_2\text{S}$ :n ja $\text{C}_3\text{S}$ :n pääasiallisena reaktiotuotteena muodostuva kalsiumsilikaattihydraatti
C-S-H-geeli	geelimäinen hydrataatiossa muodostunut kalsiumsilikaattihydraatti, jota suurin osa sementtikivestä on ja joka määrittää betonin lujuusominaisuuksia
DEF	engl. delayed ettringite formation, myöhästynyt ettringiitin muodostuminen
HDT	engl. heat distortion temperature, polymeerilattiapinnoitteiden pehmenemislämpötila
SR-sementti	sulfaatinkestävä sementti (engl. sulfate resisting cement)
TSA	engl. thaumasite sulfate attack, thaumasiitin aiheuttama sulfaatti-hyökkäys

## KÄSITTEET

Abraatio	pinnan kulumisen raskaan liikenteen vaikutuksesta
Alkali	alkalimetallit jaksollisessa järjestelmässä eli litium, natrium, kalium, rubidium, cesium ja frankium. Tarkoittaa myös emäksisyyttä
Aluminaatti	trikalsiumaluminaatti $C_3A$ , osa sementin koostumusta ja betonin haavoittuvaisin osa-aines sulfaattihyökkäyksissä
Aluminaattiyhdisteet	sementin sisältämät trikalsiumaluminaatti $C_3A$ ja tetrakalsiumaluminaattiferriitti $C_4AF$ sekä niiden hydrataatiotuotteet
Anaerobinen bakteeri	bakteeritoiminta tapahtuu hapettomissa olosuhteissa
Biologinen korroosio	suljetussa ja tuulettumattomassa jätevesiviemärissä tapahtuva rikkihapon muodostuminen betonipinnoille
Diffuusio	molekyylit siirtyvät väkevämmästä yhdisteestä laimeampaan, tasottaen pitoisuuseron pitkällä aikavälillä
Eroosio	virtaavan veden aiheuttama materiaalia irrottava vaurioituminen
Ettringiitti	trikalsiumaluminaatin $C_3A$ hydrataatiossa ja kemiallisten rasitusten aikana betonissa muodostuva yhdiste, $C_6A\bar{S}_3H_{32}$
Friedelin suola	muodostuu kloridien sitoutuessa aluminaattiyhdisteiden hydrataatiotuotteiden kanssa, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$
Harts	kemiallisten aineiden kiinteä tai jähmeä seos
Hehkutushäviö	ainetta hehkuvan kuumana lämmitettäessä jäljelle jäävien palamattomien aineiden osuus
Huokonen	ilman tai veden täyttämä tyhjä tila betonissa
Hydraatti	hydrataatiossa muodostunutta ainetta
Hydrataatio	vedettömän materiaalin ja veden reaktio, jossa muodostuu uutta hydraattia; betonin tapauksessa sementin ja veden välinen kemiallinen reaktio, joka aiheuttaa betonin kovettumisen
Hydrataatioaste	lukuarvo 0 – 1, joka kuvaa hydratoituneen sementin prosenttiosuutta koko sementtimäärästä, tunnus $\alpha$
Hydrolyysi	kemiallinen yhdiste hajoaa lähtöaineikseen veden vaikutuksesta
Ioninvaihto	metalli-ionit siirtyvät liuoksesta hartsiin eli kemiallisten aineiden kiinteään tai jähmeään seokseen
Kalsiumsuola	happohyökkäyksen yhteydessä muodostuneita betonin kalsiumyhdisteiden suoloja
Karbonatisoituminen	raudoituksen syöpymistä lisäävä kemiallinen reaktio
Kavitaatio	neste kiehuu alipaineen vaikutuksesta ja sen virtaussuunnan muuttuessa pinnalle muodostuu rakennetta rapauttavia kavitaatiokuplia
Kemikaali	aine jolla on tietty kemiallinen koostumus, tässä työssä betonia kemiallisesti rasittava aine



Kipsi	lujuusominaisuuksiltaan heikko materiaali, kalsiumsulfaattihydraatti $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Kloridi	erilaisten aineiden suolia, jotka sisältävät kloridi-ionin ( $\text{Cl}^-$ )
Konvektio	lämmön siirtyminen lämmön aiheuttamien virtausten mukana
Kovettuminen	betonin lujuudenkehitys, joka alkaa sementin ja veden yhdistämisestä
Kyllästyminen	liuos on kyllästynyt, kun liuokseen on liuennut suurin mahdollinen määrä liukenevaa ainetta (kuten suolaa) tietyssä lämpötilassa
Liukeneminen	liuottava aine (kuten vesi) sekoittuu siihen liukenevan aineen kanssa, muodostaen uutta liuosta
Mineraali	kiinteässä muodossa esiintyvä aine tai yhdiste
Monosulfaatti	trikalsiumaluminaatin $\text{C}_3\text{A}$ hydrataatiossa muodostuva kalsiummonosulfaattialumiinihydraatti, $3\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$
Neutraloituminen	happaman ja emäksisen aineen reagoidessa keskenään, muodostuvan liuoksen pH-arvo lähestyy neutraalia. Reaktiossa muodostuu suoloja
Nukleaatio	reaktion seurauksena muodostuvan aineen muodostumisen ensimmäinen vaihe
Notkeus	betonimassan työstettävyyttä kuvaava ominaisuus
Paisuminen	aineen tilavuuden kasvu, kovettunutta betonia vaurioittava ilmiö
Pehmeä vesi	vähän kalsium- ja magnesiumioneja sisältävää vettä, kuten sade- ja lumivesi
pH-arvo	aineen happamuutta kuvaava luku, liuoksen aktiivisuuden kymmenkantaisen logaritmin vastaluku normaalisti asteikolla 0 – 14 (hapan – emäksinen)
Portlandiitti	kiteytynyt kalsiumhydroksidi ( $\text{CH}$ )
Portlandsementti	Suomessa yleisin käytössä oleva sementtityyppi
Pozzolaani	betonin sideainetyyppi, joka reagoi sementin hydrataatiossa vapautuvan kalsiumhydroksidin kanssa, muodostaen hydrataatiossa sementtikiven tyyppistä pysyvää kalsiumsilikaattihydraattia
Reologia	oppi nesteen muodonmuutoksista ja virtauksista
Saostuminen	aineen erottuminen nesteestä kiinteään muotoon
Seosaine	hienojakoinen epäorgaaninen aine, jota voidaan käyttää betonin valmistuksessa sideaineena
Sementtikivi	kovettunut sementtipasta
Sementtiliima	tuore sementtipasta
Sementtipasta	sementin ja veden seos, joka kovettuu sementtikiveksi
Sideaine	hienoksi jauhettu epäorgaaninen aine, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa sementtipastan
Sitoutuminen	materiaali jäykistyy ja menettää notkeusominaisuutensa

Sitoutunut vesi	vettä, joka on sitoutunut hydrataatiotuotteisiin, eikä pääse haihtumaan betonista
Sulfaatti	sulfaatit ovat erilaisten yhdisteiden sulfaatti-ioneja ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ja ne ovat pääosin haitallisia betonille
Sulfidi	rikin yhdiste $\text{S}^{2-}$
Suola	kemiallisten aineiden yhdiste, joka useimmiten on kiteisessä muodossa
Thaumasiiitti	sulfaattihyökkäyksen aikana mahdollisesti betonissa muodostuva yhdiste, $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Vapaa vesi	vettä, joka pääsee haihtumaan betonista
Vesi-sementtisuhte	betonin sisältämän veden ja sementin massojen suhde

# 1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:n toimeksiannosta kiinnostuksesta betonin kemikaalikestävyyteen teollisuusrakentamisen kohteissa vaikuttavien kemikaalien alaisena. Joissain teollisuuden kohteissa on ollut kemikaalien aiheuttamia vaurioita, koska ei ole ymmärretty miten suojata betonirakenteita oikealla tavalla. Aihepiiristä ei ole paljoa tietoa saatavilla luonnollisia kemiallisia rasituksia lukuun ottamatta. Viime vuosina ymmärrys betonirakenteiden kestävydestä on parantunut huomattavasti uusien elektronimikroskooppitekniologioiden kehityttyä ja tultua markkinoille, mahdollistaen uudenlaiset tutkimusmenetelmät. Parantuneella teknologialla pystytään tarkastelemaan betonin mikrorakennetta aiempaa tarkemmin, jolloin saadaan entistä parempaa käsitystä mikrorakenteesta tapahtuvista ilmiöistä [1]. Huomionarvoisia mikroskooppitekniologioita ovat esimerkiksi SEM (engl. Scanning Electron Microscopy) sekä TEM (engl. Transmission Electron Microscopy) [1], joita monet tämän työn lähdemateriaalina käytetyt tieteelliset tutkimukset kiittelevät.

Työtä aloiteltaessa tehtiin päätös, että ei ole käytännöllistä tarkastella yksittäisiä kemikaaleja ja niiden vaikutuksia betoniin erilaisten kemikaalien suuren lukumäärän johdosta. Työn tarkastelu päädyttiin rajaamaan kemikaaliryhmiin yleisellä tasolla. Jotkin työissä käsitellyt kemikaaliryhmät, kuten hapot, ovat laajoja käsitteitä ja kuten aina kemiallisesti kuormitettuja betonirakenteita suunniteltaessa, tarkastelu tulee tehdä mahdollisimman tapauskohtaisesti.

Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jossa pyritään hyödyntämään oppikirjojen tyyllisiä julkaisuja siellä missä mahdollista. Lisäksi käytetään tieteellisissä julkaisuissa esitettyjä tutkimuksia paikallisesti käsiteltäessä tiettyä aihetta, jotta saadaan tarkentavaa tieteellistä informaatiota kyseisestä ilmiöstä. Työ pitkälti koostuu näiden kahden lähdetyyppin yhdistelystä. Aihepiiriin voi syventyä tutustumalla työssä käytettyihin tieteellisiin tutkimuksiin ja niiden lähdemateriaaleihin. Suomen betoniyhdistyksen (by) sekä Suomen betonilattiayhdistyksen (BLY) julkaisut tarjoavat hyviä ohjeita betonirakentamiseen. Ne sisältävät ohjeita myös kemikaaleilta suojaamiseen. Ne eivät kuitenkaan sovelu käytettäväksi Suomen ulkopuolella, koska ne eivät ole virallisia EN standardeja.

Betonin kemiallinen ja kemikaalikestävyys on haastava ja monimutkainen kokonaisuus, joka perustuu sementtikemian ilmiöihin. Sementtikemiassa tarkastellaan sementin ja sen osa-aineiden kemiallisia reaktioita sementin valmistuksesta betonin kovettumisprosessin loppuun asti [2]. Sementtikemiassa pyritään selittämään sementin hydrataatioprosessissa tapahtuvia ilmiöitä kemian kautta. Sementtikemiaa pyritään työssä käsittelemään suppeana versiona, sillä työn tarkoituksena on käsitellä aihepiiriä käytännön rakennesuunnittelun näkökulmasta. Sementtikemian käyttö niin sanotusti laajemmin ja syväli-

semmin olisi erittäin raskasta luettavaa keskiverto rakennesuunnittelijalle. Lähdemateriaalina on esitetty lukuisia tieteellisiä julkaisuja, joihin lukija voi tutustua halutessaan lisätietoa sementtikemiasta ja sen käsitteistä.

Työn tarkastelu keskittyy betonin ja erityisesti sementin ominaisuuksien ja hydrataation ymmärtämiseen. Hydrataation eteneminen ja hydrataatiossa muodostuneiden tuotteiden koostumus ovat osa kemiallisten reaktioiden prosessia betonin elinkaaren aikana. Betonin ulkopuoliset kemikaalit ja kemialliset yhdisteet aiheuttavat kemiallisia reaktioita sementin hydrataatiossa syntyneissä tuotteissa sekä hydratoitumattomissa sementtiklinkkerin mineraaleissa. Pohja tälle ymmärrykselle luodaan työn alussa, jonka jälkeen siirrytään tarkastelemaan erilaisten kemikaaliryhmien aiheuttamia kemiallisia reaktioita ja mitä niistä seuraa betonille. Työn loppupuolella esitellään keinoja kemikaalien aiheuttamien rasitusten torjumiseksi, sekä käydään läpi betonin käyttöikäsuunnittelua, joka liittyy aiheeseen erittäin vahvasti.

Diplomityössä ei tulla käsittelemään yksityiskohtaisesti betonin keskeisiä ominaisuuksia, jotka eivät suoranaisesti liity betonin kemialliseen kestävyYTEEN. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi betonin lujuusominaisuudet. Lukijalla oletetaan olevan käsitys betonista materiaalina tämän työn aihepiiriin tutustuessaan.

Työn tuloksina saadaan tunnistettua erilaiset yleiset kemikaaliryhmät ja esiteltyä sekä tunnistettua niiden aiheuttamia tyypillisiä vauriomekanismeja. Vauriomekanismien toiminta käydään läpi, jotta ymmärretään mitä tapahtuu ja mikä vaurion aiheuttaa. Kun vaurioitumismekanismi ymmärretään hyvin, osataan rasitukselta suojautua oikealla tavalla sementtikemiallisesta näkökulmasta katsottuna. Tällöin pystytään suunnittelemaan taloudellisia ja teknisesti toimivia betonirakenteita haastavissa kemiallisesti rasitetuissa ympäristöissä.

Diplomityön luvussa 2 tarkastellaan betonin koostumusta, osa-aineiden ominaisuuksia ja vaikutuksia betonin rakenteeseen sekä betonin mikrorakennetta ja sen ominaisuuksia. Luvussa 3 tarkastellaan erilaisia kemiallisia rasituksia kemikaaliryhmittäin. Luvussa 4 esitellään kemikaalien aiheuttamia rasitusmekanismeja betonirakenteelle. Luvussa 5 käsitellään betonirakenteen suojaamista aggressiivisilta kemikaaleilta koostumuksella tai pinnoittamalla rakenne, sekä esitellään betonin saumakohtien toteutusta kemikaalitiiviisti. Luvussa 6 esitetään lyhyesti betonin käyttöikäsuunnittelun periaatteet sekä erityispiirteitä, joita tulee huomioida suunniteltaessa kemikaalin rasittamaa betonirakennetta. Luvussa 7 käsitellään tiivistetysti betonirakenteen korjaamisesta kemikaalin aiheuttaman vaurion jäljiltä. Diplomityön liitteenä on tehty betonin käyttöikäsuunnittelun ja kemikaalien aiheuttamien rasitusten suunnitteluohje diplomityössä esiteltyjen asioiden pohjalta Pöyry Finland Oy:n käyttöön.

## 2. BETONIN KOOSTUMUS, OMINAISUUDET JA MIKRORAKENNE

Betonin koostumus on pääasiallinen betonin kemialliseen kestävyysvaikutukseen vaikuttava asia [2]. Betoni koostuu sementistä (yleisimmin portlandsementti [2]), vedestä, kiviaineksesta sekä mahdollisista lisäaineista. Betoni on emäksinen rakennusaine, jonka pH-arvo kovettuneena on noin 12 – 13,5 [3, s. 53]. Betonin emäksisyys on eräs tärkeimmistä asioista sen kemikaalikestävyyttä määriteltäessä. Betonin emäksisyyteen vaikuttaa pääasiassa betonin sisältämä kalsiumhydroksidi [3, s. 53]. Kemikaaleille alttiille betonirakenteille suunnittelija määrittelee betonin koostumuksen kohteen kemikaalirasituksen perusteella [4, s. 32]. Erilaiset betonit ja niiden osa-aineet reagoivat - tai eivät reagoi ollenkaan erilaisten kemikaalien kanssa eri tavoin, joten on selvitettävä mitä kemikaaleja kyseisessä teollisuusympäristössä käsitellään betonin ominaisuuksia määritettäessä [5, s. 23]. Betonin tiiviys on merkittävä tekijä aggressiivisten kemikaalien rasitusten kestävyttä suunniteltaessa, mikä käytännössä tarkoittaa aggressiivisia kemikaaleja kestävien betonien olevan usein korkeampaa lujuusluokkaa kuin vastaavissa kohteissa käytettävät betonit ilman kemikaalikestävyysvaatimusta [5].

Betonin säilyvyyteen vaikuttaa sen kemiallinen hajoamisnopeus. Ympäristöstä betoniin kulkeutuu ioneja ja molekyylejä, jotka reagoivat betonin sisältämien reaktiivisten aineiden kanssa. Ympäristön lisäksi betonissa itsessään voi olla osa-aineena betonille aggressiivisia aineita. Vaikka betoni sisältäisi aggressiivista ainetta, sen täytyy päästä kulkeutumaan reaktiivisten osa-aineiden yhteyteen reagoidakseen vaadittavissa olosuhteissa. Pääasiallinen betonin sisäistä aineiden kulkeutumista mahdollistava asia on veden läsnäolo, joko nesteinä tai höyrynä. Reaktio tapahtuu normaalisti heti aineiden kohdattua. Kulkeutumisnopeus vaikuttaa reaktioiden kulkuun ja niiden vauriovaikutuksiin. Kulku-nopeutta edesauttavat betonissa olevat halkeamat sekä betonin pinnan huokoisuus. [3, s. 53]

Mikäli betonin koostumuksen avulla ei saada haluttua suojaustasoa, voidaan betonipinta pinnoittaa kemikaalikestävyysparantamiseksi. Monet teollisuuden kemikaalit rasittavat kaikkia normaaleja sementtilajeja, jolloin pinnoitus voi olla ainoa keino suojata betonirakennetta riittävällä varmuudella [6]. Betonin pinnoittamista käsitellään luvussa 5.2.

Betonointi kylmissä olosuhteissa, kuten talvibetonointi voi vaikuttaa betonin kemikaalikestävyyskehitykseen negatiivisesti, mikäli lämmityksestä ei huolehdita [7]. Betonin kemikaaleista aiheutuneen korroosion nopeus kiihtyy, mikäli tuore betoni on altistunut kylmyydelle kovettumisvaiheessa eikä saavuta suunniteltuja tiiviys- ja lujuusominaisuuksia huokosrakenteen heikon kehityksen johdosta [7].

Betonin ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: betonimassan ominaisuudet, alle vuorokauden ikäisen betonin ominaisuudet ja kovettuneen betonin ominaisuudet [8, s. 69]. Laajemmin betonin ominaisuuksista ja vaatimuksista voi lukea standardista SFS-EN 206 ja kyseiseen standardiin liittyvistä standardeista.

Luvussa 2 esitellään taustailmiöitä betonista ja sementistä, joilla on yhteys betonin kemikaalikestävyyteen. Tarkoituksena on selittää betonin kemikaalikestävyyteen liittyviä betonin ja sementin ominaisuuksia tiivistetysti.

## 2.1 Sementti

Sementti on hydraulinen sideaine eli hienojakoinen epäorgaaninen materiaali, joka muodostaa veden kanssa reagoidessaan lujan ja kestävästä materiaalin [8, s. 24] [9]. Sementtistandardi SFS-EN 197-1 määrittelee sementin ”sementti on hydraulinen sideaine, jolla tarkoitetaan hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa pastan, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta ja joka kovettumisen jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla” [9]. Portlandsementti on käytetyin sementtityyppi, sekä betonin kemiallisesti reagoiva osa-aines, jolla on ominaisuus kemiallisesti reagoida veden kanssa liittäen betonin kiviaineksen yhtenäiseksi betoniksi [2] [6]. Sementti on hienoksi jauhettua epäorgaanista ainetta, joka alkaa kovettua kun sitä sekoitetaan veden kanssa, muodostaen sementtipastaa [8, s. 24]. Sementtipasta sitoutuu, eli menettää plastiset muodonmuutoskykynsä, ja kovettuu sekoittamisen jälkeen, eikä kovettumisen jälkeen reagoi veden kanssa [2] [4, s. 28]. Sementin reaktiota veden kanssa kutsutaan hydrataatioksi ja sitä käsitellään luvussa 2.1.1.

Portlandsementti koostuu portlandsementtiklinkkeristä, johon lisätään kalsiumsulfaattia (eli kipsiä) sementin sitoutumisajan kontrolloimiseksi [2]. Portlandklinkkerin pääraaka-aine on kalkkikivi, joka murskataan, lajitellaan ja siirretään raakajauhemylllyyn [8, s. 24-25]. Raakajauhe poltetaan kiertouunissa ja kalkki-, pii-, alumiini- ja rautayhdisteet reagoivat kalsiumyhdisteiksi ja muodostavat lopulta sementtiklinkkeriä lämpötilan noustessa noin 1450 °C:een [8, s. 25]. Sementit valmistetaan sementtiklinkkeristä jauhamalla klinkkeriä, seosaineita sekä kipsiä kuulamyllyllä hienoksi jauheeksi [8, s. 25]. Lisäämällä klinkkeriin seosaineita voidaan tehdä erilaisia sementtilaatuja [8, s. 25]. Käytettäviä seosaineita käsitellään luvussa 2.4.

Kalkkikivi koostuu pääosin kalsiumkarbonaatista ( $\text{CaCO}_3$ ), piioksidista ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidista ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidista ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [8, s. 24]. Kalkkikivi murskataan, jauhetaan ja kuumennetaan kiertouunissa, jolloin kiertouunissa oleva jauhe sulaa osittain ja klinkkerimineraalit muodostuvat [8, s. 25]. Portlandsementtiklinkkerin sementtikemiassa käytössä oleva mineraloginen koostumus sisältää neljä päämineraalia: aliitti (trikalsiumsilikaatti, lyhenne  $\text{C}_3\text{S}$ ), beliitti (dikalsiumsilikaatti, lyhenne  $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminaatti (trikalsiumaluminaatti, lyhenne  $\text{C}_3\text{A}$ ) sekä ferriitti (tetrakalsiumaluminaattiferriitti, lyhenne  $\text{C}_4\text{AF}$ ) [2] [8, s. 25]. Lisäksi portlandsementtiklinkkerissä on vapaata kalkkia, magnesiumoksidia ( $\text{MgO}$ ) sekä pieniä määriä alkaliyhdisteitä [8, s. 28]. Alkaleilla tarkoitetaan kemian jaksollisen järjestelmän mukaisia alkalimetalleja eli litiumia, natriumia, ka-

liumia, rubidiumia, cesiumia sekä frankiumia [10]. Sementtikemian kannalta relevantteimmat ovat natrium ja kalium, joita esiintyy pääosin betonin huokosvedessä [2]. Alkaleita on myös sitoutuneena betonin hydrataation aikana muodostuvaan geelimäiseen kalsiumsilikaattihydraattiin eli C-S-H-geeliin [11].

Portlandsementtiklinkkerin koostumus esitetään sementtikemiassa normaalisti mineralogisena koostumuksena [8, s. 25-28]. Säätelemällä näiden neljän mineraalin ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) suhteita portlandklinkkerissä sekä sementissä käytettäviä seosaineita, voidaan vaikuttaa sementin ominaisuuksiin [8, s. 25]. Sementtikemiassa puhutaan usein faaseista (esimerkiksi aliittifaasi, nestefaasi) sementin ja sen hydrataation rakennetta käsiteltäessä [2]. Portlandsementin faaseista voi lukea lisää esimerkiksi lähteestä [2]; faasien käsittely ei ole tämän työn asioiden kannalta oleellista, mutta niiden ymmärtäminen on tarpeellista, mikäli haluaa ymmärtää sementtikemian ilmiöitä laajemmin kuin tässä työssä esitellään.

Sementtikemiassa kemialliset kaavat esitetään oksideiksi laskettuina ja niistä käytetään tyypillisesti lyhenteitä  $C = CaO$  (kalkki),  $S = SiO_2$  (piiksid),  $A = Al_2O_3$  (alumiinioksidi),  $F = Fe_2O_3$  (rautaoksidi),  $H = H_2O$  (vesi),  $\bar{S} = SO_3$  (rikkitrioksidi) sekä  $CH = Ca(OH)_2$  (kalsiumhydroksidi) [2]. Portlandsementtiklinkkerien tyypillisiä kemiallisia ja mineralogisia koostumuksia esitetään taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Klinkkerien tyypillisiä kemiallisia ja mineralogisia koostumuksia [8, s. 26]

Yhdiste (mineraloginen lyhenne)	Normaali klinkkeri [%]	SR-klinkkeri [%]	Valkoklinkkeri [%]
CaO (C)	64,0	64,0	69,0
SiO (S)	21,0	22,0	25,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	5,1	2,9	1,9
Fe <sub>3</sub> O <sub>3</sub> (F)	2,8	4,4	0,3
MgO	3,5	2,5	0,6
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O + pieni määrä muita	1,6	1,0	0,2
Mineraloginen koostumus			
C <sub>3</sub> S	58	65	65
C <sub>2</sub> S	16	14	21
C <sub>3</sub> A	9	1	5
C <sub>4</sub> AF	8	13	1

Portlandsementtiklinkkerin eri osa-aineksille on esitetty vaatimuksia ja suurimpia sallittuja määriä sementtistandardissa SFS-EN 197-1. Portlandsementtiklinkkerin koostumuksesta vähintään kaksi kolmasosaa on oltava kalsiumsilikaatteja  $C_2S + C_3S$  [9]. Painosuhteen  $C / S$  on oltava vähintään 2,0 [9]. Magnesiumoksidipitoisuus (MgO) saa olla enintään 5,0 painoprosenttia [9]. Sementtiin lisättävien lisäaineiden kokonaismäärä ei saa ylittää 1,0 % (tai orgaanisilla lisäaineilla kuiva-ainesmäärä 0,2 %) sementin painosta, pigmenttejä lukuun ottamatta [9]. Lisäaineiden määrät saavat olla suurempia, jos suurin sallittu määrä on ilmoitettu pakkauksessa tai toimitusasiakirjassa [9].

### 2.1.1 Portlandsementin hydrataatio

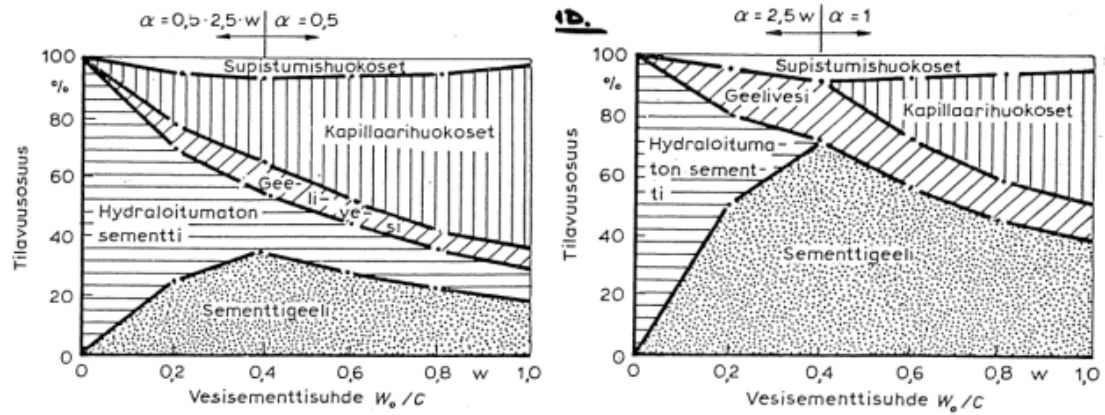
Hydrataatio on prosessi, jossa vedetöntä materiaalia sekoitetaan veden kanssa, mistä muodostuu uutta hydraattia [12, s. 241]. Sementtikemiassa hydrataatiolla tarkoitetaan sementin tai jonkun sen osa-aineen reagoimista veden kanssa, jolloin tapahtuu kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia, joka sitouttaa ja kovettavaa sementin, kiviaineksen ja veden betoniksi [12, s. 241]. Portlandsementin hydrataatio on monimutkainen prosessi [2] [12, s. 241]. Portlandsementin hydrataatioprosessi on sarja saman- tai eriaikaisesti tapahtuvia kemiallisia reaktioita, josta suurin osa tapahtuu ensimmäisten päivien aikana, mutta prosessi voi jatkua vuosien ajan, mikäli siihen käytettävää vettä riittää betonissa [2]. Hydrataation aikana kehittyy ja vapautuu runsaasti lämpöä [2]. Hydrataatioon vaikuttaa monta eri asiaa kuten sementtiklinkkerin koostumus sekä kiderakenteessa olevat vieraat ionit, sementin hienous, vesi-sementtisuhte, jälkihoidon lämpötila, käytetyt seos- ja lisäaineet, kalsiumsulfaatin määrä sekä hydrataatiolämpö [12, s. 241-242,264]. Lämpötilan noustessa 10 °C, sitoutumisaika puolittuu [8, s. 37]. Betonin lujuudenkehitys jatkuu niin kauan kuin hydrataatioreaktio jatkuu, eli käytännössä useiden vuosien ajan [2].

Sementti tarvitsee kovettuakseen vettä vähintään noin 40 % sementin painosta. Tätä sementin ja veden suhdetta kutsutaan vesi-sementtisuhteeksi ja se on eräs tärkeimmistä betonin ominaisuuksista [8, s. 37]. Tässä työssä vesi-sementtisuhteella tarkoitetaan vesi-sideainesuhdetta niissä tapauksissa, joissa betonin sideaineena on muuta kuin puhdasta portlandsementtiä. Vesi-sementtisuhte vaikuttaa muodostuvan sementtipastan reologiaan, hydrataation etenemiseen ja hydrataatiotuotteen ominaisuuksiin ja on kenties tärkein yksittäinen indikaattori muodostuvan betonin ominaisuuksille [2] [12, s. 241]. Veden ja sementin sekoittuessa sementin sisältämät silikaatit ja alumiinatit muodostavat hydrataatiotuotteita [2]. Teoreettisesti vesi-sementtisuhteen ollessa noin 0,2 – 0,25 vettä riittää koko sementin hydrataatioon, mutta koska vettä sitoutuu fysikaalisesti geeli-huokosiin noin 15 - 20 % sementin painosta, ideaalisen hydrataation edellyttämä vesimäärä on noin 40 - 45 % sementin painosta, eli vesi-sementtisuhteen tulee olla noin 0,4 – 0,45 [8, s. 37]. Käytännön betoneilla vesi-sementtisuhte on kuitenkin usein korkeampi, sillä massan tulee olla tarpeeksi notkeaa työstettävyyden parantamiseksi [13].

Portlandsementin hydrataatio alkaa spontaanisti veden kosketuksesta sementtiin ja siihen liittyy voimakasta lämmönvapautumista [12, s. 241]. Hydrataatiossa sementtijauheen ja veden muodostama plastinen seos vähitellen muuttuu kiinteäksi materiaaliksi [2]. Hydrataation alussa muodostuva sementtiliima eli tuore sementtipasta on plastista materiaalia [2]. Hydrataation edetessä pasta sitoutuu ja kovettuu muodostaen veteen liukenematonta sementtikiveä [2]. Hydrataatio koostuu sementin osa-aineiden ja veden välisistä reaktioista, jotka tapahtuvat vaiheittain alkaen veden ja sementin sekoittamisesta ja useimmiten jatkuen vuosien päähän [2]. Hydrataation etenemistä voidaan kuvata hydrataatioasteella ( $\alpha$ ), joka ilmaistaan lukuarvona 0 – 1,0; missä 1,0 tarkoittaa tilaa, jossa 100 prosenttia sementistä on hydratoitunut [13]. Kuvassa 1 esitetään hydratoituneen sementtikiven koostumusta hydrataatioasteilla 0,5 ja 1,0. Hydrataatioasteella 1,0 voidaan huomata, että ihanteellinen vesi-sementtisuhte betonille on 0,4 luokkaa, sillä täl-

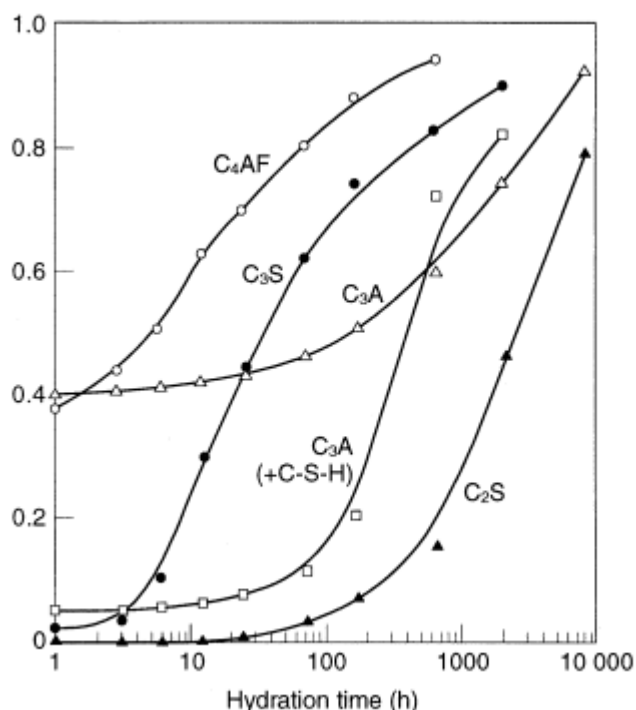


löin vettä riittää koko sementin hydrataatioon, eikä betoniin pääse muodostumaan betonille haitallisia kapillaarihuokosia. Hydratoituneen betonin osa-aineksien tilavuusosuuksista ja vesi-sementtisuhteen vaikutuksesta niihin kerrotaan luvussa 2.6.



**Kuva 1.** Sementtikiven osien tilavuusosuudet vesisementtisuhteen muuttuessa, hydrataatioasteilla  $\alpha = 0,5$  ja  $\alpha = 1,0$ . [13]

Portlandsementin hydrataatio jaetaan normaalisti viiteen vaiheeseen: alkuvaihe, lepo-vaihe, kiihtyvä vaihe, hidastuva vaihe ja loppuvaihe [2] [12, s. 265-268]. Kahdesta ensimmäisestä vaiheesta käytetään myös yhteisnimitystä induktiovaihe [14]. Hydrataatioon osallistuvat portlandsementin klinkkerimineraalit reagoivat eri vauhtia, joka puolestaan vaikuttaa miten hydrataatio etenee vaiheesta toiseen ja kuinka nopeasti [2]. Tarkastelemalla yksittäisten klinkkerimineraalien hydrataatioasteita tietyllä ajanhetkellä saadaan kuvaa siitä, mikä vaikuttaa betonin lujuuden ja tiiviyyden kehitykseen, mitä puolestaan voidaan verrata sementin koostumukseen. Klinkkerimineraalien hydrataatioasteiden etenemistä ajan funktiona on esitetty kuvassa 2.



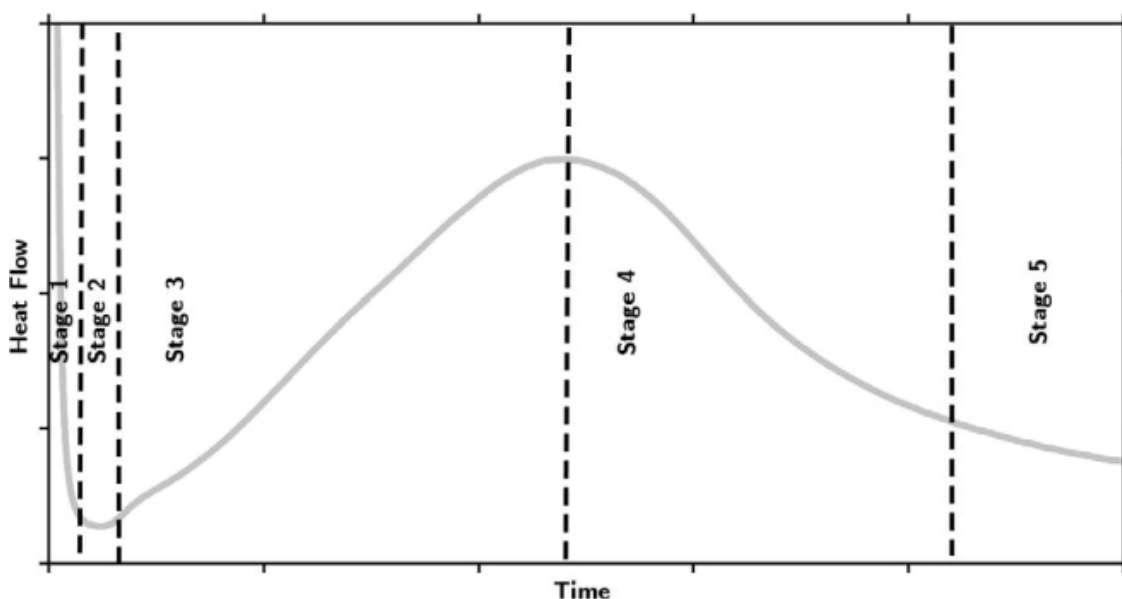
**Kuva 2.** Klinkkerimineraalien hydrataatioasteen kehittyminen. C<sub>3</sub>A:n hydrataatioasteen kehittyminen on esitetty ilman ja lisätyn (+C-S-H) kipsin kanssa. [12, s. 258]

Hydrataation alkuvaiheessa klinkkerimineraalien ja kalsiumsulfaatin liukenemisnopeudet määrittävät reaktion kulkunopeutta [2]. Noin 15 minuuttia veden lisäämisestä molekyylin osuus liuoksessa ylittää kriittisen pitoisuuden ja ensimmäiset reaktiotuotteet saostuvat kerrosrakenteisina ns. nuklideina, jotka muodostuvat (nukleoituvat) suoraan sementtihiukkasten pinnalle [1]. Hydrataation edetessä hiukkaset kokoontuvat yhteen ja muodostavat uutta geelimäistä ainetta (nukleaatio), kalsiumsilikaattihydraattia eli C-S-H-geeliä, jonka tilavuus on yli kaksinkertainen alkuperäisiin aineisiin verrattuna [2]. C-S-H-geeliä muodostuu nopeasti, mutta tämä alkuvaihe loppuu pian (sekunneissa – minuuteissa) hydrataatioasteen ollessa vain 2 – 4 % luokkaa [14]. C-S-H-geeli saostuu sementtipartikkelien pintaan ja sementin kalsiumpitoisuus nousee merkittävästi [2] [12, s. 265] [14].

Alkuvaiheen jälkeen reaktio hidastuu muutaman tunnin lepovaiheen ajaksi [2] [12, s. 266]. Tämän aikana sementin kalsiumhydroksidipitoisuus (CH) nousee ja saavuttaa maksimiarvonsa [2] [12, s. 266]. Lepovaihe päättyy toisen vaiheen C-S-H:n nukleaation alkamiseen [12, s. 266].

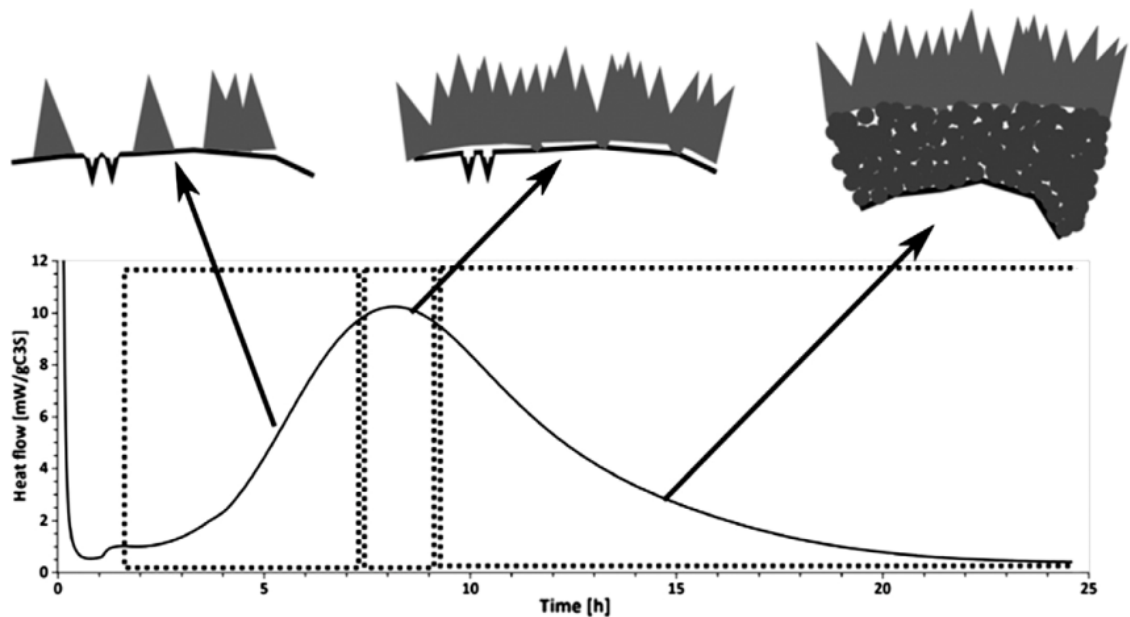
Lepovaiheen jälkeen hydrataatioreaktio lähtee uudelleen liikkeelle kiihtyvässä vaiheessa (noin 3-12 tuntia sekoittamisen jälkeen) [2] [12, s. 266] [14]. Tässä kolmannessa vaiheessa C<sub>3</sub>S:n hydrataatio kiihtyy ja C-S-H-geeliä sekä kiteytynyttä kalsiumhydroksidia eli portlandiittia alkaa saostua nopeaa vauhtia kaikkialle sementtipastaan [2] [14]. Koko sementin hydrataationopeus puolestaan seuraa C-S-H-geelin muodostumisnopeutta [14]. C-S-H-geelin muodostumisnopeus hidastuu kun sen muodostumiseen vapaana olevan pinnan osuus sementissä pienenee [14].

Hydrataation myöhäisvaiheessa (noin päivästä eteenpäin) hydrataatio hidastuu reagoimattoman materiaalin määrän pienentyessä sementissä [2]. Hydrataation nopeus tässä vaiheessa riippuu diffuusiosta betonissa [12, s. 266]. C-S-H-geelin muodostuminen jatkuu edelleen  $C_3S$ :n ja  $C_2S$ :n hydrataatioreaktioiden jatkuessa [14], tosin CH:n muodostuminen pienentyy [12, s. 266]. Hydrataatio pyrkii jatkumaan kunnes kaikki sementti on hydratoitunut, tai kunnes betonista loppuu vesi [2] [12, s. 266-267]. Tästä huolimatta pieni osa suurista sementtipartikkeleista ei välttämättä reagoi koskaan [2]. Vesi-sementtisuhteen ollessa liian korkea, suurikin osa sementtiä voi jäädä hydratoitumatta kuvan 1 mukaisesti. 28 päivän kohdalla hydrataatioaste tyypillisellä portlandsementillä on 80 % luokkaa ja lujuutta on kehittynyt noin 75 % suunnittelulujuudesta [14]. Kuvassa 3 on esitetty  $C_3S$ :n hydrataation kulkua vesi-sementtisuhteen ollessa 0,4.



**Kuva 3.**  $C_3S$ :n hydrataation eteneminen ja lämmönkehitys ajan funktiona vesi-sementtisuhteella 0,4. Stage 1 on alkuvaihe, stage 2 lepovaihe, stage 3 kiihtyvä vaihe, stage 4 hidastuva vaihe ja stage 5 myöhäisvaihe. [15]

Hydrataation aikana muodostuvaa mikrorakennetta voidaan jaotella sisempään ja ulompaan alueeseen. Hydrataation pysyviä reaktiotuotteita alkaa muodostua kiihtyvän vaiheen aikana [14]. Piikkimäisiä C-S-H ”neuloja” nukleoituu kehinä hydratoitumattoman materiaalin ympärille, jotka muodostavat alustavan ulomman alueen [14]. Pinnan ollessa näiden piikkimäisten kiteiden peitossa, tiivistä C-S-H-geeliä sisältävää sisempää aluetta alkaa muodostua [2] [12, s. 255] [14]. Tiiviin sisemmän alueen muodostumisen jälkeen, piikkimäisten C-S-H ”neulojen” täyttämälle alueelle alkaa muodostua ulommaksi alueeksi kutsuttua materiaalia alueille, jotka olivat alun perin veden täyttämiä [2] [12, s. 255] [14]. Ulompi alue ei ole tiiviisti pakkautunutta [12, s. 255], vaan siellä on tyhjiä taskuja, joita on esitelty luvun 3.2 kuvassa 7 [16]. Ulompi alue koostuu C-S-H-geelin ja CH:n sekoituksesta tai vaihtoehtoisesti  $C_3S$ :n ja  $C_4AF$ :n reaktiotuotteista [2]. Sisemmän alueen muodostumista havainnollistetaan kuvassa 4.



**Kuva 4.** C-S-H "neulojen" ja sisemmän alueen muodostuminen hydrataation edetessä. Kaksi ensimmäistä aluetta kuvaavat C-S-H "neulojen" muodostumista ja viimeinen sisemmän alueen muodostumista. [14]

Portlandsementin hydrataation monimutkaisuuden vuoksi sementtikemiassa tarkastellaan yleensä neljän eri päämineraalin hydrataatioita omina kokonaisuuksinaan [2] [12, s. 243]. Kokonaiskuvaa tulee kuitenkin katsoa yhtenäisenä ja arvioida komponenttien yhteisvaikutuksia [2].  $C_3S$ :n ominaisuuksia ovat nopea lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö sekä sulfaatinkestävyys [8, s. 28].  $C_2S$ :n ominaisuuksia ovat hidas lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, matala hydrataatiolämpö sekä sulfaatinkestävyys [8, s. 28].  $C_3A$ :n ominaisuuksia ovat suuri reagointinopeus ja vedentarve, pieni loppulujuus, erittäin korkea hydrataatiolämpö sekä sulfaatinkestämättömyys [8, s. 28].  $C_4AF$ :n ominaisuuksia ovat hidas lujuudenkehitys, pieni loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö sekä sulfaatinkestävyys [8, s. 28]. Tässä työssä käsitellään lyhyesti  $C_3S$ :n ja  $C_3A$ :n hydrataatioreaktioita ja niiden tärkeimpiä reaktiotuotteita.

Portlandsementtien koostumuksesta suurin osa on trikalsiumsilikaattia  $C_3S$ , joten luonnollisesti sen hydrataatio on tärkein kokonaiskuvan kannalta [2] [12, s. 243] [14].  $C_3S$ :n hydrataatiota ja sen reaktiotuotteena muodostuvaa kalsiumsilikaattihydraattia eli C-S-H-geeliä käsitellään luvussa 2.1.2.  $C_3S$ :n hydrataation toissijaisena tuotteena muodostuva kalsiumhydroksidi (CH) on syy kovettuneen betonin emäksiseen pH-arvoon, joka myös toimii suojana raudoitukselle betonissa [3, s. 53] [17, s. 14]. CH:lla ei ole lujutusta parantavia ominaisuuksia, eikä se juuri liukene veteen [17, s. 14]. CH on avainasemassa monien kemikaalien, kuten happojen, aiheuttamissa kemiallisissa reaktioissa.

Portlandsementin hydratoitunut sementtipasta on kovettuneen betonin haavoittuvin osa kemiallisen rasituksen kohdistuessa betoniin ja sementtipastan potentiaalisesti haavoittuvaisin osa-aines kemiallisille hyökkäyksille on sen sisältämä  $C_3A$  ja reaktiotuotteet [6].  $C_3A$ :n hydrataatiossa muodostuvaa ja siihen liittyvää ettringiittiä käsitellään erikseen luvussa 2.1.3. Ettringiitti ja siihen liittyvien ilmiöiden ymmärtäminen ovat tärkeitä,

mikäli halutaan ymmärtää betonin käyttäytymistä sulfaattirasitukselle ja muulle kemikaalirasituksille altistettuna.

Hydratoitunut portlandsementtipasta on huokoista materiaalia, joka koostuu kolmesta hydrataatiotuotteesta ja huokosista [2]. Betonin huokosrakennetta käsitellään luvussa 2.6. Päätuote hydratoituneessa sementtipastassa on C-S-H-geeli [2]. Tämän lisäksi hydratoitunut sementtipasta koostuu kalsiumhydroksidista CH ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) sekä niin kutsutusta AFm:stä, joka tarkoittaa kaikkia  $\text{C}_3\text{A:n}$  ja  $\text{C}_4\text{AF:n}$  lopullisia hydrataatiotuotteita [2]. Näiden osuutta hydratoituneesta sementtipastasta esitellään taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Hydratoituneen tyypin I portlandsementtipastan koostumus vesi-sementtisuhteella 0,5. [2]

Komponentti	Approksimatiivinen tilavuusprosentti [%]	Mainintoja
C-S-H	50	Amorfinen, sis. mikrohuokoisuutta
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	12	Kiteinen
AFm	13	Kiteinen
Huokokset	25	Riippuu vesi-sementtisuhteesta

### 2.1.2 C-S-H-geeli

Aliitti eli epäpuhdas  $\text{C}_3\text{S}$  on portlandsementin tilavuusosuudeltaan suurin osa-aines ja sillä on tärkeä vaikutus sementtipastan sitoutumiseen ja varhaislujuuden kehittymiseen [2].  $\text{C}_3\text{S:n}$  hydrataatio koostuu monesta vaiheesta, joiden aikana materiaalin lämpötila ja olomuoto vaihtelevat [15]. Noin 70 %  $\text{C}_3\text{S:sta}$  hydratoituu 28 vuorokauden kuluessa reaktion alkamisesta ja käytännössä kaikki ensimmäisen vuoden aikana [2]. Ennen varsinaisen hydrataation alkua  $\text{C}_3\text{S:n}$  pinta hydratoituu ympäristössä olevan kosteuden vaikutuksesta ja muodostaa ohuen kalvon sementtipartikkelien ympärille, mikä pysyy paikallaan hydrataatioprosessin ajan [14]. Tämän niin kutsutun induktiovaihteen jälkeen  $\text{C}_3\text{S}$  alkaa nukleoitumaan nopeasti [14].  $\text{C}_3\text{S:n}$  reagoi sementin kanssa sekoitettavaan veteen, ne muodostavat pääasiallisena reaktiotuotteena geelimäistä kalsiumsilikaattihydraattia eli C-S-H-geeliä ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ , käytetään myös nimitystä C-S-H) ja toissijaisena kalsiumhydroksidia eli CH:ta [2]. Beliitin  $\text{C}_2\text{S}$  hydrataatio muistuttaa  $\text{C}_3\text{S:n}$  hydrataatiota muuten paitsi se kulkee huomattavasti hitaammin (kuva 2) ja siinä muodostuu suhteessa enemmän C-S-H:ta ja vähemmän CH:ta [2].

C-S-H-geelin muodostuminen on pääasiallinen syy sementin sitoutumiseen [2]. C-S-H-geelin sitoutuminen on pääasiallinen syy betonin lujuudenkehitykseen, sillä sitä on suurin osa sementistä ja se omaa hyvät lujuusominaisuudet [2]. C-S-H-geeli voi esiintyä kalvomaisena, kuitumaisena, hiutalemaisena, kennomaisena, verkkomaisena, tiukkaan pakkaantuneina rakeina tai tiheänä piirteettömänä materiaalina [2] [12, s. 255]. Hydrataation alkupuolella C-S-H-geeli on kalvomaista tai kuituista [2]. Hydrataation edetessä C-S-H-geeli muuttaa muotoaan, pakkautuen tiheämmin sisemmäksi alueeksi ja lopulta tiivistyen piirteettömäksi materiaaliksi sisemmälle alueelle hydratoitumattoman materi-

aalin ympärille [2]. Hydrataation myöhemmässä vaiheessa C-S-H-geeliä kehittyy ulkoisella alueella, missä sitä on CH-partikkeleiden ja monosulfaatin / ettringiitin joukossa [2] luvun 3.2 kuvan 7 mukaan esitetyllä tavalla. Hydratoituneessa sementtipastassa C-S-H-geeli on enimmäkseen amorfista [2].

### 2.1.3 Ettringiitti

Betonin kemikaalikestävyyden kannalta kenties tärkein hydrataatiotuote on trikalsiumalumiinaatin ( $C_3A$ ) hydrataation aikana muodostuva ettringiitti ( $C_6\bar{A}_3H_{32}$  [2]).  $C_3A$  reagoi nopeasti veden kanssa muodostaen aluminaattihydraatteja, mikä johtaa nopeaan sitoutumiseen [2]. Sitoutumisen hidastamiseksi portlandsementtiklinkkeriin lisätään aina kalsiumsulfaattia, jolloin hydrataation alkuvaiheessa hydratoituvan  $C_3A$ :n osuus on merkittävästi pienempi, jonka ansiosta betoni pysyy työstettävänä tarvittavan ajan [2] [15]. Kalsiumsulfaatin oletetaan absorboituvan  $C_3A$ :han, mikä hidastaa hydrataatiota [18]. Kalsiumsulfaatin absorboitumisnopeus riippuu  $C_3A$ :n ominaispinta-alasta [18].

Kalsiumsulfaatin ja  $C_3A$ :n välisessä reaktiossa muodostuu ettringiittiä.  $C_3A$ :n hydrataatioreaktioon kuuluu kaksi eksotermistä (lämpöä vapauttavaa) vaihetta, joista ensimmäisessä ettringiittiä muodostuu hitaasti  $C_3A$ :n pintaan [2], mutta tällä ei tutkimusten mukaisesti ole suoranaista vaikutusta hydrataation kulkuun [18]. Ettringiitin muodostumisnopeus riippuu  $C_3A$ :n ominaispinta-alasta ja sulfaatin hidastavasta vaikutuksesta  $C_3A$ :n liukenemiseen [15]. Kun kalsiumsulfaatti on kulunut loppuun hydrataation hidastuvassa tai loppuvaiheessa, ettringiitti alkaa reagoida  $C_3A$ :n kanssa muodostaen kalsiummonosulfaattialumiinihydraattia ( $3C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$ , monosulfaatti), joka kiteytyy ohuiksi levyiksi lähelle  $C_3A$ :n pintaa [2] [16]. Kaikki ettringiitti ei kuitenkaan katoa sementistä, vaan pyrkii täyttämään betonin sisäisiä rakoja ja tyhjiöitä [16]. Syynä ettringiitin katoamiseen valmiista betonista on sen ”kilpailu” kalsiumsulfaatista C-S-H-geelin sekä betonin huokosten kanssa hydrataation aikana [16].

$C_3A$ :n on todettu olevan kenties haavoittuvin osa-aines sementtipastassa kemikaalihyökkäyksille (erityisesti sulfaattihyökkäyksissä) [6] ja ettringiitti on tässä avainasemassa [19]. Ettringiitin tilavuus on alkuperäisiä reaktiotuotteita suurempi ja sen muodostuminen paisuttaa betonia suuren tilavuutensa vuoksi pyrkiessään laajentumaan kovettuneen betonin sisällä [5, s. 23] [16]. Plastisessa muodossa olevassa sementtipastassa ettringiitin muodostumisella ei juuri ole merkitystä betonin ominaisuuksiin, mutta kovettuneelle betonille tämä on erittäin haitallista [5, s. 23] [16]. Betoniin kohdistuvan kloridirasituksen torjunnassa korkeammalla  $C_3A$ -pitoisuudella on todettu olevan hyviä ominaisuuksia [20], joita esitellään luvussa 3.6.

Ettringiitti vaatii muodostuakseen sulfaattia (normaalisti ilmaistuna rikkiatrioksidina,  $SO_3$ ) sekä alumiinioksidia ( $Al_2O_3$ ) [2] [16].  $SO_3 / Al_2O_3$  moolisuhde vaikuttaa hydrataation lopussa muodostuneeseen  $C_3A$ :n reaktiotuotteeseen [2] [16]. Mikäli suhde on 1,0 lopussa muodostuu monosulfaattia [2].  $SO_3/Al_2O_3$ -suhteen ollessa korkea ettringiittiä saattaa jäädä jäljelle [2]. Suhteen ollessa pieni monosulfaatissa saattaa tapahtua anionien vaihtoa, minkä seurauksena lopputuote muuttuu kiinteäksi liuokseksi [2]. Portlandse-

mentin  $\text{SO}_3$ -pitoisuus on rajoitettu standardin SFS-EN 197-1 mukaisesti 3,5 – 4,5 % sementin painosta [9], koska muuten hydrataation edetessä voi potentiaalisesti muodostua hallitsemattoman paljon ettringiittiä [12, s. 274].

Betonin lämpökäsittelyn suurin lämpötila on rajattu 60 °C, sillä yli 70 °C lämpötiloissa kovettuneessa betonissa voi tapahtua myöhästynyttä ettringiitin muodostumista [8, s. 134] [16]. Myöhästynyttä ettringiitin muodostumista, joka tapahtuu liian korkean lämpökäsittelyn seurauksena tai kemiallisten rasitusten alaisena betonissa, käsitellään luvussa 3.2.

#### 2.1.4 Sementtityypit

Betonin valmistuksessa käytettävien sementtien tulee olla CE-merkittyjä ja täyttää standardin SFS-EN 197-1 mukaiset vaatimukset [8, s. 29]. Standardin mukaisista 27 [9] erityyppisestä sementistä vain osan katsotaan soveltuvan suomalaisiin olosuhteisiin by 65 Betoninormit 2016 mukaisesti. Tässä työssä sementtityypeistä käsitelläänkin vain Suomen olosuhteisiin sopivia. Standardi SFS-EN 197-1 lajittelee sementit viiteen päälajiin niiden koostumuksen perusteella:

CEM I	Portlandsementti
CEM II	Portlandseossementti
CEM III	Masuunikuonasementti
CEM IV	Pozzolaanisementti
CEM V	Seossementti. [9]

Sementin päälajit jaetaan edelleen sementtilajeihin käytetyn sideaineen ja sideainemäärien mukaisesti [9]. Standardin SFS-EN 197-1 mukaiset sementin sideaineet ovat masuunikuona (S), kalkkikivi (L tai LL), silika (D), pozzolaanit (P tai Q), lentotuhka (V tai W) sekä poltettu liuske (T) [9]. Suomessa sallitut sementtilajit ja niiden koostumukset esitetään taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Suomessa sallittujen sementtien koostumukset. [8, s. 30]

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset [%]					
	klinkkeri	kuona	silika	lentotuhka	kalkkikivi	muut
CEM I	95...100	-	-	-	-	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	-	-	-	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	-	-	-	0...5
CEM II/A-D	90...94	-	6...10	-	-	0...5
CEM II/A-V	80...94	-	-	6...20	-	0...5
CEM II/B-V	65...79	-	-	21...35	-	0...5
CEM II/A-LL	80...94	-	-	-	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...88	12...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	-	-	-	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	-	-	-	0...5

Sementeillä on kolme eri standardilujuusluokkaa. Standardilujuudella tarkoitetaan puristuslujuutta 28 vuorokauden iässä, minkä on vähintään oltava luokan nimen suuruinen (MPa). Sementtistandardin SFS-EN 197-1 mukaiset standardilujuusluokat ovat luokka 32,5, luokka 42,5 sekä luokka 52,5 [9]. Lujuusluokkiin liittyy tunnus varhaislujuudesta [9]. Tunnus N tarkoittaa normaalia varhaislujuutta, tunnus R korkeaa varhaislujuutta ja tunnus L alhaista varhaislujuutta [9]. Luokka L koskee vain CEM III–sementtejä. Nämä lujuusluokat eivät vastaa kovettuneen betonin lujuusluokkia, vaan betonin lujuusluokkaan vaikuttavat muutkin tekijät, kuten vesi-sementtisuhde.

Eräs standardisoitujen sementtityyppien pääasiallisista eroista on niiden sulfaatinkestävyys. Sementtipastan  $C_3A$  on sementtipastaan pääasiallinen osa-aines, johon sulfaattihyökkäys kohdistuu, joten sen osuutta sementtiklinkkerissä pienentämällä voidaan suoraan parantaa betonin sulfaattikestävyyttä [6].  $C_3A$  on herkkä sulfaateille, sillä niiden reagoidessa keskenään muodostuu tilavuutta paisuttavia ettringiittiyhdisteitä, josta aiheutuu sisäistä painetta ja betonin rapautumista [8, s. 40]. Masuunikuonasementin kestävyys sulfaattirasituksia vastaan on huomattavasti Portlandsementtiä parempi [21]. Sulfaatinkestäväksi määritellyissä rakenteissa edellytetään käytettävän standardin SFS-EN 197-1 mukaista sulfaatinkestävää sementtiä CEM I-SR3, tai sementin sideaineen täytyy sisältää vähintään 70 % masuunikuonaa sideaineen kokonaismäärästä [4, s. 32]. Sulfaatinkestävien sementtien lujuudenkehitys on hitaampaa niiden pienen  $C_3A$ -pitoisuuden tai niiden sisältämän masuunikuonan johdosta [8, s. 28,57], mikä kannatta huomioda, mikäli rakennetta aletaan kuormittaa suurella kuormalla pian valun jälkeen.

Sementti voidaan katsoa sulfaatinkestäväksi (SR-sementti) standardin SFS-EN 197-1 mukaan sementtityyppien mukaisesti. Sulfaatinkestäviä portlandsementtejä on kolme erilaista niiden klinkkerin sisältämän  $C_3A$ -pitoisuuden mukaisesti: CEM I-SR 0, CEM I-SR 3 ja CEM I-SR 5, joissa lukuarvo kuvaa suurinta sallittua  $C_3A$ -pitoisuutta klinkkerissä pitoisuusprosentteina. Sulfaatinkestäviä masuunikuonasementtejä on kaksi kappaletta: CEM III/B-SR ja CEM III/C-SR, eikä niillä ole  $C_3A$ -pitoisuusvaatimuksia. Masuunikuonasementit katsotaan sulfaatinkestäviksi niiden masuunikuonan osuuden ol-



lessa vähintään 70 % portlandklinkkerin ja kuonan yhteismäärästä. Sulfaatinkestäviä pozzolaanisementtejä on kaksi kappaletta: CEM IV/A-SR (luonnon pozzolaaneja tai silikaattipitoista lentotuhkaa on 21 – 35 %) ja CEM IV/B-SR (36 – 55 %), joiden molempien  $C_3A$ -pitoisuuden tulee olla korkeintaan 9 %. [9]

## 2.2 Kiviaines

Kiviaineksella tarkoitetaan betonissa käytettävää rakeista materiaalia, kuten hiekkaa, soraa ja kalliomursketta [8, s. 43]. Betonista kiviainesta on noin 65 - 80 % tilavuudesta [8, s. 43]. Suomalainen kiviaines on yleisesti lujaa, kulutusta ja pakkasta kestävää eikä sisällä merkittäviä pitoisuuksia haitallisia aineita [8, s. 43]. Yleensä riittää että betonin valmistaja huolehtii käyttämästään kiviaineksesta standardin SFS-EN 12620 mukaisesti [8, s. 43-44] [22, s. 6,27-33]. Kiviaineksen lujuus on normaalisti valmiin betonin lujuutta huomattavasti suurempaa ja käyttämällä hyvälaatuista ja sopivan raekoon omaavaa kiviainesta voidaan parantaa betonin iskun- ja kulutuskestävyyttä [8, s. 50-51]. Tästä huolimatta betonin kemiallisen kestävyyskannalta on oleellista tuoda esille alkali-kiviainesreaktio, jota käsitellään luvussa 3.1.

Kiviaineksen ominaisuuksilla on harvoin merkitystä betonin kemialliseen kestävyyskannalta. Joissain tapauksissa huokoiset kiviaineslajit (kuten hiekkakivi) betonin pinnalla saattavat vähentää betonipinnan tiivyyttä ja mahdollistaa aggressiivisten aineiden tunkeutumisen betonin sisään. Huokoiset kiviaineslajit myös imevät itseensä enemmän vettä ja kuitistuvat kuivumiskutistumisen vaikutuksesta. Kalkkikivi saattaa liueta aggressiivisten happojen ympäristössä, jolloin se poistuu betonin pinnan rakenteesta kokonaan. Kiviaineksen sisältämät sulfaatit (kuten kipsi eli kalsiumsulfaatti) voivat aiheuttaa betonin paisumista sisäisen ettringiitin aiheuttaman laajenemisen vaikutuksesta. [12, s. 971,976-978]

Kiviaineksen tulee olla hyvänlaatuista, eikä se saa sisältää epäpuhtauksia kuten roskia tai jätettä. Lisäksi kiviaineksen ei tule sisältää heikkoa materiaalia, kuten savea, lunta tai jäätä. Kiviaineksen tulee olla rakeisuudeltaan kyseiseen betoniin sopivaa ja pakkasenkestävissä kohteissa sen vedenimun tulee olla alle 1 %. Kiviaines ei saa olla radioaktiivista. Kiviaines ei saa sisältää haitallisia määriä humusta. Kiviaineksen kloridipitoisuus tulee olla matala ja se määritetään tarvittaessa. Kiviaineksen kokonaisrikkimäärä saa olla korkeintaan 1 %, poikkeuksena tästä ilmajäähdetty masuunikuona (2 %) ja magneettikiisua sisältävä kiviaines (0,1 %). [8, s. 45, 51-53]

Kiviainekselta saatetaan vaatia normaalia korkeampaa kulutuksen- ja iskunkestävyyttä teollisuusrakentamisessa kovan rasituksen alaisena tai korkealujuusbetonissa [8, s. 51]. Lisäksi korkeampaa kiviaineksen kestävyyskannalta voidaan vaatia betonilattioissa, joihin kohdistuu kovaa mekaanista rasitusta esimerkiksi raskaasta ja kovapyöräisestä trukkilienteestä tai muusta ajoneuvoliikenteestä [13]. Betonissa käytettävän kiviaineksen ominaisuuksia ja vaatimuksia on esitelty laajemmin ja tarkemmin standardissa SFS-EN 12620 Betonikiviainekset [23].

## 2.3 Vesi

Vesi on sementin ja kiviaineksen ohella kolmas betonin tekemiseen vaadittava osaines. Vesi antaa betonimassalle työstettävyyssominaisuuksia ja se on osa betonin kovettumisreaktiota. Suomessa vesi kelpaa käytettäväksi betonissa ilman tutkimuksia, kunhan se ei ole luonnon pintavettä tai teollisuuden jätevettä [8, s. 59]. Viemäriverdet eivät koskaan sovellu käytettäväksi [8, s. 59]. Vesi ei saa vaahdota tai sisältää levää, pieneliöitä, öljyjä tai rasvoja [8, s. 59]. Öljyt ja rasvat voivat estää hydrataation kulun ja heikentää tartuntaa [8, s. 59]. Betonissa käytettävän veden ominaisuuksia ja vaatimuksia on käsitelty standardissa SFS-EN 1008 [24].

Vettä on betonissa sekä vapaana vetenä että sitoutuneena. Vapaa vesi pääsee haihtumaan betonista, sitoutunut vesi sitoutuu hydrataatiossa sementin osa-aineiden kanssa, eikä pääse haihtumaan betonista. Kovettuneessa sementissä on vettä eri tavoilla sidoksissa. Kiinteimmin vesi on sementin kemiallisten yhdisteiden molekyyliä. Vähemmän kiinteästi vettä on adsorboituneena geelihuokosten pinnoille. Lisäksi vettä on imeytyneenä kapillaarihuokosissa. Näiden lisäksi vettä on kemiallisesti sitoutuneena hydrataatiotuotteina muodostuneiden hydraattien molekyyliä. Kovettuneeseen sementtipastaan sitoutuneen veden määrä riippuu sementin koostumuksesta, hydrataatioasteesta sekä käytetystä määritelmästä sitoutuneen veden määrää mitatessa. [12, s. 250]

## 2.4 Seosaineet

Seosaine on hienojakoinen epäorgaaninen aine, jota voidaan käyttää betonin valmistuksessa sideaineena parantamaan sen tiettyjä teknisiä ja taloudellisia ominaisuuksia riippuen käytetystä seosaineesta [4, s. 29]. Seosaineita on tyyppiä I ja II, näistä tyyppin I aineet eivät reagoi muiden betonin osa-aineiden kanssa [4, s. 29], joten tarkastelu rajoitetaan heti alkuun tyyppin II seosaineisiin. Tyyppin II seosaineet ovat joko pozzolaanisesti [4, s. 29] tai piilevästi hydraulisesti reaktiivisia [4, s. 29]. Tuoreissa tutkimuksissa on tutkittu monien uusien ja esimerkiksi kierrätysmateriaalien käyttöä seosaineena, jotka ovat alustavasti näyttäneet lupaavia tuloksia ominaisuuksiltaan. Näitä ei käsitellä työssä sen tarkemmin, koska tutkittavia seosaineita on monia ja harvoja tunnetaan tarpeeksi hyvin, että niitä voisi käyttää käytännön kohteissa.

Pääasiallisia tyyppin II seosaineita ovat lentotuhka, silika sekä jauhettu granuloitu masuunikuona [4, s. 29] [8, s. 56]. Näille aineille on omat standardinsa, jotka määrittelevät niiden ominaisuuksia [4, s. 29]. Lentotuhka ja silika ovat pozzolaanisia seosaineita eli ne muodostavat hydrataatiossa reagoidessaan kalsiumhydroksidin (CH) kanssa kalsiumsilikaattihydraattigeeliä (C-S-H-geeli) [8, s. 56-57]. Masuunikuonalla on piilevä hydraulinen ominaisuus eli kyky muuttua hydrauliseksi heräteaineen (esimerkiksi portlandsementin hydrataatiossa vapautuvan kalsiumhydroksidin) vaikutuksesta [8, s. 57]. Seosaineiden käyttöä betonissa on rajoitettu, koska niillä on myös epäsuotuisia ominaisuuksia. Esimerkiksi seosaineiden käyttö vähentää CH:n osuutta kovettuneessa betonissa, mikä puolestaan johtaa muun muassa karbonatisoitumisen nopeutumiseen [5, s. 14]. Betonin valmistukseen käytettävien seosaineiden enimmäismäärät riippuvat sementin se-

sainemäärästä sekä betonirakenteen rasitusluokasta [8, s. 58]. Enimmäismääriä määritettäessä sementin oletetaan sisältävän suurimmat määrät seosainetta, jollei paremmin tunneta [8, s. 58]. Seosaineiden enimmäismäärien määrittäminen rasitusluokittain esitetään taulukossa 4. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6.

**Taulukko 4.** Betonin valmistuksessa käytettävien seosaineiden suurimmat sallitut määrät rasitusluokittain lasketaan seuraavasti. [4, s. 33]

Rasitusluokka	Suurin sallittu seosainelisäys [%]		
	Masuunikuona	Lentotuhka	Silika
X0	$(100 - k_s - 0,053k_s) - 1,00lt - 9,0sil$	$(100 - k_s - 1,00lt_s) - 0,053k - 9,0sil$	$(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,053k - 1,00lt$
XC1	0,053	1,00	9,0
XC2, XC3 XC4, XS1 XS2, XD1 XD2, XF1 XF3, XA1	$(100 - k_s - 0,25k_s) - 2,22lt - 9,0sil$ 0,25	$(100 - k_s - 2,22lt_s) - 0,25k_s - 9,0sil$ 2,22	$(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,25k - 2,22lt$ 9,0
XS3 XD3	$(100 - k_s - 0,25k_s) - 2,22lt - 9,0sil$ 0,25	$(100 - k_s - 3,33lt_s) - 0,25k - 9,0sil$ 3,33	$(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,25k - 2,22lt$ 9,0
XF2, XF4	InfraRYL 2006 <i>Sillan betonirakenteet</i> kohdan 42020.1.2 mukaan.		

Kaikki annostusprosentit lasketaan alkuperäisestä sementistä.

$k_s$  on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa [%]  
 $k_s$  on sementin sisältämä masuunikuonajauhe [%]  
 $lt_s$  on sementin sisältämä lentotuhka [%]  
 $sil_s$  on sementin sisältämä silika [%]  
 $k$  on sementin sisältämän ja lisätyn masuunikuonajauheen yhteismäärä [%]  
 $lt$  on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä [%]  
 $sil$  on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä [%]

Seosaineilla on erilaisia aktiivisuuksia [4, s. 32] eli betonistandardin SFS-EN 206 mukaisia k-arvoja [25]. k-arvo kuvaa osaa seosaineesta, jonka voidaan katsoa korvaavan sementtiä [25]. Seosaineilla vesi-sementtisuhte korvaantuu termillä ”vesi / (sementti + k x seosaine) –suhde”, jolloin (sementti + k x seosaine) –määrän on oltava vähintään yhtä suuri kuin kyseisen rasitusluokan mukainen vaadittu vähimmäissementtimäärä [25]. Tästä saadaan määritettyä seosaineiden enimmäislisäyksiä sementin CEM I -painosta määritettynä rasitusluokittain [25].

Lentotuhkalle k-arvo 0,4 on sallittua sementtilajeille CEM I ja CEM II/A. Sementtilajille CEM I lentotuhkan enimmäismäärän, joka huomioidaan, on täytettävä massavaatimus: lentotuhka / sementti  $\leq 0,33$ , ja sementtilajille CEM II/A  $\leq 0,25$ . Toisin sanoen lentotuhkan suhteen sementtiin ollessa 0,33, 40 % lisätystä lentotuhkasta lasketaan sementiksi ja 60 % hienoksi kiviainekseksi. [25]

Silikalle k-arvot sallitaan betonille, jossa käytetään silikaa sisältämättömiä sementtilajeja CEM I ja CEM II/A. Vesi-sementtisuhteen ollessa  $\leq 0,45$  k-arvona käytetään 2,0. Vesi-sementtisuhteen ollessa  $> 0,45$  k-arvona käytetään 2,0 lukuun ottamatta rasitusluokkia XC ja XF, joissa  $k = 1,0$ . Luokan 1 silikan enimmäismäärä, joka huomioidaan, on

massasuhde silika / sementti  $\leq 0,11$ . Luokan 2 silikalle käytetään betonin käyttöpaikalla voimassa olevia sääntöjä. Silikaa käytettäessä sementin määrä saa olla korkeintaan 30 kg / m<sup>3</sup> pienempi kuin kyseisen rasitusluokan vaadittu vähimmäisementsimäärä. [25]

Masuunikuonalle standardi suosittelee käytettäväksi k-arvoa 0,6 sementtilajeille CEM I ja CEM II/A. Jauhetun granuloidun masuunikuonan enimmäismäärän tulee täyttää massasuhde masuunikuona / sementti  $\leq 1,0$ . [25]

Seosaineet ovat sementtityypin ja vesi-sementtisuhteen valinnan kanssa pääasiallinen tapa vaikuttaa betonin kemikaalikestävyyteen sen koostumuksen kautta. Erilaiset seosaineet toimivat erilaisia kemikaalirasituksia vastaan eri tavoin ja seosaineiden vaikutuksia on esitelty luvun 3 kemikaaliryhmien yhteydessä, kuten myös luvun 4 rasitusmekanismien yhteydessä. Seosaineiden osuuksista sementissä puhuttaessa tarkoitetaan aina niiden painoprosenttia tilavuusosuuden sijaan, jollei erikseen ole muuta ilmoitettu. Suomessa käytettävien seosaineiden tulee olla CE-merkittyjä [8, s. 56].

### 2.4.1 Lentotuhka

Lentotuhka on jauhetun kivihiilen poltossa voimalaitosten savukaasuista erotettu tuote [8, s. 56]. Betonissa käytetyllä lentotuhkalla on pozzolaanisia ominaisuuksia [17, s. 13]. Lentotuhkan käyttöä betonissa voidaan perustella sekä taloudellisilla, teknillisillä että ekologisilla perusteilla [17, s. 6]. Lentotuhkan taloudellisuus perustuu siihen, että jokaista käytettyä lentotuhkatonnia kohden sementtiä voidaan vähentää 400 kiloa ja tämän lisäksi lentotuhkan käyttö vähentää hienoimpien eli kalliimpien kiviaineslajikkeiden tarvetta betonissa [17, s. 6].

Lentotuhkan raekoko on 1 – 150 µm luokkaa [8, s. 56]. Lentotuhkan raekoon vuoksi voidaan hienon kiviaineksen eli fillerin osuutta betonissa pienentää [8, s. 56]. Lentotuhkat jaetaan kolmeen eri luokkaan A – C hehkutushäviön (eli lentotuhkan sisältämän palamattoman hiilen osuuden) perusteella standardin SFS-EN 450-1 mukaisesti [26]. Lentotuhkan käytöllä voidaan parantaa betonimassan notkeutta ja koossapysyvyyttä [8, s. 56]. Lentotuhkan koostumusta ja standardin SFS-EN 450-1 mukaisia vaatimuksia esitellään taulukossa 5.

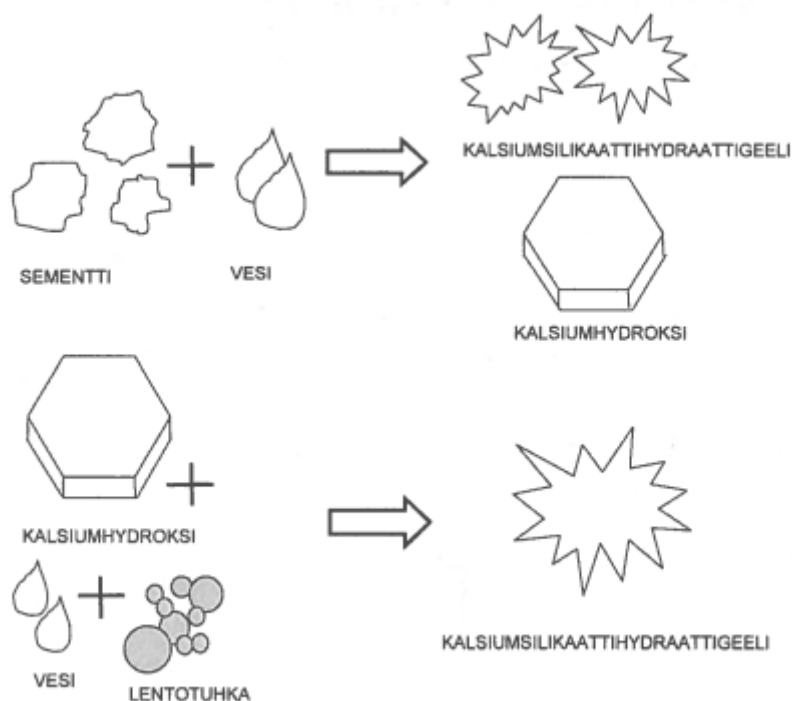
**Taulukko 5.** Betonissa käytettävän lentotuhkan koostumus, perustuu lähteisiin [13] [26]

	Tyypillinen koostumus [%] [13]	Koostumuksen vaatimus SFS-EN 450-1 [%] [26]
SiO <sub>2</sub>	40 – 60	≥ 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 – 30	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 – 13	
CaO	1 – 9	≤ 10,0
MgO	3 – 5	
Na <sub>2</sub> O		≤ 5,0
K <sub>2</sub> O	1 – 4	
SO <sub>3</sub>	0,5 – 2	≤ 3,0
Cl <sup>-</sup>	0,01 – 0,1	≤ 0,10
Hehkutushäviö / palamaton hiili	1 – 15	≤ 5*
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		≥ 70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		≤ 5,0
Läpäisy 45 µm seulalla	55 – 80	≥ 60 ± 10**

\*Hehkutushäviö perustuu palamattoman hiilen määrään. Luokassa A ≤ 5 %, luokassa B ≤ 7 % ja luokassa C ≤ 9 %.

\*\*Luokan N hienousvaatimus ≥ 60±10 % läpäisee. Luokan S hienousvaatimus ≥ 88 % läpäisee.

Lentotuhkan koostumuksesta suurin osa on piioksidia (S). Lentotuhkan piioksidi reagoi portlandsementin hydrataation aikana muodostuvan kalsiumhydroksidin (CH) kanssa, muodostaen yhdessä CH:n ja veden kanssa C-S-H-geeliä silikaattimineraalien hydrataatioreaktion tavoin [17, s. 14]. Lentotuhkan sisältämällä piioksidilla on erinomaiset ominaisuudet C-S-H-geelin muodostamista varten sen piioksidin fysikaalisen rakenteen la- simaisuudesta johtuen [17, s. 14]. Tätä reaktiota havainnollistetaan kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kaaviokuva sementin ja lentotuhkan reaktioista. [17, s. 15]

Lentotuhkan pozzolaaninen reaktio on tavallisen portlandsementin hydrataatiota hitaampi lentotuhkan pienemmän hydrataatiolämmön vuoksi [8, s. 56]. Mikäli lentotuhka ei pysty reagoimaan veden tai CH:n puutteesta johtuen, se toimii betonissa kiviainesta vastaavana passiivisena hienoaineeksena [13]. Reaktionopeudesta johtuen lentotuhkaa sisältävän betonin lujuudenkehitys on tavallista portlandsementistä valmistettua betonia hitaampaa [8, s. 56]. Tästä johtuen lentotuhkan käyttöä talvibetonoinnissa tulisi välttää [8, s. 56]. Lentotuhkan käyttö vähentää mahdollisen huokostavan lisäaineen tehoa [8, s. 56]. Pakkasenkestävässä betonissa, joka sisältää lentotuhkaa, saa käyttää vain A-luokan lentotuhkaa ja sitä saa olla korkeintaan 25 % sementin määrästä [13].

Mikäli betonissa on tarpeeksi kosteutta käytettäväksi, lentotuhka tuottaa pysyviä reaktiotuotteita ja kuluttaa CH:ta samalla [13]. Tämä lisää betonin tiiviyyttä ja parantaa myöhäisvaiheen kemiallista kestävyyttä [13]. Lentotuhkan pozzolaaninen reaktio ei kuitenkaan kuluta CH:ta niin paljoa, että se alentaisi huokosveden pH-arvoa betoniterästen kannalta merkittävästi [13]. Lentotuhkan käyttö saattaa suurentaa plastista kutistumaa vedenerottumisen pienennyksen johdosta [17, s. 12]. Yhteenveto lentotuhkan vaikutuksista betonin ominaisuuksiin on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Lentotuhkan vaikutus betonin ominaisuuksiin verrattuna portlandsementistä valmistettuun vastaavaan betoniin. [13]

Betonin ominaisuus	Lentotuhkan vaikutus
Massan työstettävyys	paranee, kun hehkutushäviö on pieni
Massan koossapysyvyys	paranee
Hydratoitumislämpö	vähenee lievästi
Varhaislujuus $t < 7$ d	pienenee lievästi
Jäätymislujuus	saavuttaminen hidastuu
Lämpötilan vaikutus kovettumisnopeuteen	kasvaa
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Myöhäislujuus $t > 91$ d	kasvaa lievästi
Huokostilavuus ja lisäilman pysyvyys massassa	vaikeutuu, etenkin kun hehkutushäviö on suuri
Pakkasenkestävyys	ei muutu, kun suojahuokostus ok
Kutistuma, viruma ja kimmomoduuli	ei muutu
Sulfaatinkestävyys	ei muutu
Vesitiiviys	paranee lievästi
Betonipeitteen paksuustarve	ei muutu

## 2.4.2 Masuunikuona

Masuunikuona on lasimainen materiaali, jota saadaan rautamalmia sulatettaessa masuunissa [27]. Masuunikuonan painosta vähintään 2 / 3 on lasimaista kuonaa [27]. Masuunikuonan lasimaisella muodolla on kolmea eri laatua riippuen sen jäähdystystavasta, ja niillä on erilaiset piilevät hydrauliset ominaisuudet [13]. Betonin valmistukseen käytetty masuunikuona on normaalisti jauhettua granuloitua masuunikuonaa sen hyvien piilevien hydraulisten ominaisuuksien ansiosta [8, s. 57]. Taulukossa 7 esitetään tyypillisen granuloidun masuunikuonajauheen koostumus sekä standardin SFS-EN 15167-1 mukaiset vaatimukset.

Masuunikuona muuttuu hydrauliseksi portlandsementin hydrataatiossa sementin ja veden reaktiossa vapautuvan kalsiumhydroksidin vaikutuksesta [8, s. 57]. Masuunikuona alkaa kehittää lujuuttaan veden ja sementin kalsiumhydroksidin vaikutuksesta [8, s. 57]. Pozzolaanisista seosaineista poiketen masuunikuona ei merkittävästi kuluta kalsiumhydroksidia [13].

Masuunikuonan vedentarve on pieni ja sen käyttö notkistaa betonia [8, s. 57], mikä mahdollistaa veden vähennyksen betonissa. Masuunikuonajauheen käyttö ei muuta betonin kimmoisia ominaisuuksia, mutta sen käyttö lisää betonin pitkäaikaisia muodonmuutoksia kutistuman ja viruman vaikutuksesta [8, s. 57]. Masuunikuonajauheen käyttö heikentää betonin pakkas-suolakestävyyttä [8, s. 57].

**Taulukko 7.** Granuloidun masuunikuonajauheen koostumus, perustuu lähteisiin [13]  
[27]

	Tyypillinen koostumus [13]	Koostumuksen vaatimus SFS-EN 15167-1 [27]
CaO	35-40 %	-
MgO	7-12 %	≤ 18 %
SiO <sub>2</sub>	35-40 %	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-12 %	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 %	-
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	1,5 %	-
S <sup>2-</sup>	1 %	≤ 2,0 %
Cl <sup>-</sup>	0 %	≤ 0,10 %
<u>(CaO + MgO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</u>	~1,5	> 1
<u>SiO<sub>2</sub></u>		
CaO + MgO + SiO <sub>2</sub>		> 67 %
SO <sub>3</sub>		≤ 2,5 %
Hehkutushäviö, korjattuna sulfidin hapettumisella		≤ 3,0 %
Kosteuspitoisuus		≤ 1,0 %

Masuunikuonajauhe vähentää betonin tuottamaa hydrataatiolämpöä, minkä vuoksi se soveltuu massiivisten betonirakenteiden valuihin erinomaisesti. Masuunikuonajauhe reagoi herkästi lämpötilan muutoksille, nopeuttaen tai hidastaen hydrataatiota. Masuunikuonan käyttö hidastaa betonin kovettumisnopeutta, mutta kasvattaa myöhäisen vaiheen lujuutta. [8, s. 57]

Masuunikuonajauheen käyttö seosaineena parantaa sementin kemiallista kestävyyttä yleisellä tasolla sekä erityisesti betonin sulfaatinkestävyyttä [8, s. 57]. Masuunikuonajauheen osuuden ollessa yli 70 % betonin sideaineesta, betoni voidaan luokitella sulfaatinkestäväksi [8, s. 57]. Masuunikuonajauheen käyttö pienentää betonin huokosten keskimääräistä huokoskokoa, kuitenkin ilman vaikutusta betonin kokonaishuokoisuuteen [13].

Betoniterästen korroosiosuojan kannalta masuunikuonajauheella on kaksi merkittävää eroa portlandsementteihin. Masuunikuonajauhe kasvattaa karbonatisoitumisnopeutta tuoreessa betonissa [8, s. 57]. Kloridit vaurioittavat masuunikuonasegmentistä valmistettujen betonien betoniteräksiä portlandsementistä valmistettua betonia helpommin pienemmän kriittisen kloridipitoisuuden vuoksi [8, s. 115]. Masuunikuonasegmentti heikentää betonin pakkas-suolakestävyyttä [8, s. 57]. Yhteenveto masuunikuonajauheen vaikutuksista betoniin on esitetty taulukossa 8.



**Taulukko 8.** Masuunikuonajauheen vaikutus betonin ominaisuuksiin verrattuna portlandsementistä valmistettuun vastaavaan betoniin verrattuna. [13]

Betonin ominaisuus	Masuunikuonan vaikutus
Massan työstettävyys	paranee
Massan koossapysyvyys	ei muutu
Hydratoitumislämpö	vähenee
Varhaislujuus $t < 7$ d	pienenee lievästi
Jäätymislujuus	saavuttaminen hidastuu
Lämpötilan vaikutus kovettumisnopeuteen	kasvaa
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Myöhäislujuus $t > 91$ d	kasvaa
Pakkasenkestävyys	ei muutu, kun suojahuokostus ok
Kutistuma ja viruma	kasvaa
Kimmomoduuli	ei muutu
Karbonatisoitumisnopeus	kasvaa lievästi
Sulfaatinkestävyys	paranee
Vesitiiviys	paranee lievästi
Betonipeitteen paksuus	ei muutu

### 2.4.3 Silika

Silika on erittäin hienojakoinen pozzolaanisia ominaisuuksia omaava seosaine, jonka raekoko on luokkaa  $0,1 \mu\text{m}$  [8, s. 57] [28]. Silikaa syntyy piin valmistuksen yhteydessä sivutuotteena ja silikan koostumuksesta piioksidia  $\text{SiO}_2$  on luokan 1 silikassa vähintään 85 massaprosenttia ja luokan 2 silikassa vähintään 80 massaprosenttia [28]. Silikan hiukkaset ovat enimmäkseen lasimaista piioksidia [13]. Silikan tyypillinen koostumus sekä standardin SFS-EN 13263-1 mukaiset vaatimukset esitetään taulukossa 9.

**Taulukko 9.** Silikan koostumus ja vaatimukset, perustuu lähteisiin [13] [28]

	Tyypillinen koostumus [%] [13]	Koostumuksen vaatimus SFS- EN 13263-1 [%] [28]
$\text{SiO}_2$	86-96	$> 85$ lk.1, $> 80$ lk.2
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,1-1	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,2-0,6	-
$\text{MgO}$	0,2-3,5	-
$\text{Na}_2\text{O}$	0,8-1,8	*
$\text{K}_2\text{O}$	1,5-3,5	-
S	0,2-0,4	-
Hehkutushäviö	0,8-4,0	$< 4,0$ (1 tunnin hehkutusaika)
$\text{Cl}^-$		$< 0,3$ **
Si		$< 0,4$
CaO		$< 1,0$
$\text{SO}_3$		$< 2,0$

\* Ilmoitettava alkaliain kokonaismäärä  $\text{Na}_2\text{O}$ -ekvivalentteina (alkali-kiviainesreaktion kannalta, vaikka silikan sisältämien alkaliain vaikutus siihen on todettu vähäiseksi)

\*\* Kloridipitoisuuden ylittäessä 0,10 massaprosenttia ilmoitettava ominaisarvon yläraja

Hienojakoisuudestaan johtuen silika lisää betonin vedentarvetta, joka riippuu käytetyn silikan määrästä [8, s. 57]. Silikan osuuden ollessa 8 – 10 % sideaineen painosta, betonin vedentarve nousee noin 10 – 20 % [13]. Betonin lisääntyneen vedentarpeen johdosta silikan kanssa käytetään notkistavia lisäaineita [8, s. 57] [28].

Betonin sideaineena hienojakoinen silika lisää huomattavasti lujuutta sekä kemiallista kestävyyttä, koossapystyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä [8, s. 58]. Silikan avulla voidaan saada 15 – 25 % kohotus betonin lujuuteen vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,45 ja silikan korvatussa noin 5 – 8 % sementistä [13]. Silikan käyttö parantaa betonin fysikaalista ja kemiallista kestävyyttä, koska sen sisältämä piioksidi reagoi sementin hydrataatiossa muodostuneen kalsiumhydraatin kanssa, josta edelleen muodostuu C-S-H-geeliä, joka parantaa betonin kestävyysominaisuuksia [29].

Silika betonin osa-aineena saattaa lisätä betonin plastista kutistumaa sekä aiheuttaa betonipinnan halkeilua, mikäli betoni kuivuu vapaasti ilman jälkihoitoa [13]. Silikan käyttö betonin sideaineena parantaa sementtikiven ja kiviaineksen välistä tartuntaa, mikä myös parantaa betonin tiiviyyttä [8, s. 58]. Betonin tiiviyyttä parantamalla, silika myös parantaa betonin kemiallista kestävyyttä ja koossapystyvyyttä sekä vähentää betonin läpäisevyyttä [8, s. 58]. Silika vaikeuttaa betonin työstämistä varsinkin korkealujuusbetoneissa, joissa sementtimäärä on jo suuri [13]. Lisäksi silikan käyttö lisää jälkihoidon tarvetta silikan aiheuttaman plastisen kutistuman lisääntymisen johdosta [13]. Silikan käyttö parantaa betonin sulfaatinkestävyyttä tiivistämällä betonia ja vähentämällä betonin läpäisevyyttä, eikä vaikuttamalla  $C_3A$ -pitoisuuteen kuten normaalit sulfaatinkestävät sementit [30]. Silikan käyttö parantaa betonin kloridikestävyyttä huomattavasti, estämällä kloridi-ionien diffuusion betoniin tiiviimmän rakenteen ansiosta [30]. Yhteenveto silikan ominaisuuksista betonin seosaineena on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Silikan vaikutus betonin ominaisuuksiin portlandsementistä valmistettuun sementtiin verrattuna. [13]

Betonin ominaisuus	Silikan vaikutus
Massan koossapystyvyys	paranee
Hydratoitumislämpö	alenee lievästi
Varhaislujuus $t < 7$ d	pienenee lievästi
Jäätymislujuus	saavuttaminen hidastuu
Lämpötilan vaikutus kovettumisnopeuteen	kasvaa
Jälkihoidon tarve	kasvaa
Myöhäislujuus $t > 91$ d	kasvaa lievästi
Pakkasenkestävyys	paranee
Kemiallinen kestävyys	paranee lievästi
Kutistuma, viruma ja kimmomoduuli	ei muutu
Karbonatisoitumisnopeus	kasvaa lievästi
Vesitiiviys	paranee
Betonipeitteen paksuus	ei muutu

## 2.5 Lisäaineet

Lisäaineet ovat betonin osa-aineita, joita lisätään betonin sekoitettaessa sementin massaan verrattuna pieniä määriä joko betonimassan tai kovettuneen betonin ominaisuuksien muuttamiseksi [25]. Betonin lisäaineita käytetään betonissa sementin, veden sekä kiviaineksen lisäksi vaikuttamaan betonimassan tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin joko fysikaalisesti tai kemiallisesti [8, s. 60]. Betonin lisäaineita käytetään hyvälaatuisen betonin kanssa parantamaan sen tiettyä tai tiettyjä ominaisuuksia kuten kestävyyttä tai taloudellisuutta [8, s. 60]. Betonin lisäaineita käytetään pienissä määrissä ( $\leq 50 \text{ g} / 1 \text{ kg}$  sementtiä) ja niiden käytön onnistumisen kannalta on tärkeää käyttää niitä oikein, jolloin on mahdollista saavuttaa teknisiä ja taloudellisia etuja [8, s. 60]. Lisäaineiden käytöllä tulee olla aina selvä tavoite mihin pyritään ja tämän tulee olla taloudellisesti ja teknisesti perusteltua. Lisäaineilla saattaa olla sivuvaikutuksia ja sivuaineiden yhteistointa voi olla epävarmaa, joten käyttäjän tulee osata käyttää tuotteita oikein [8, s. 60].

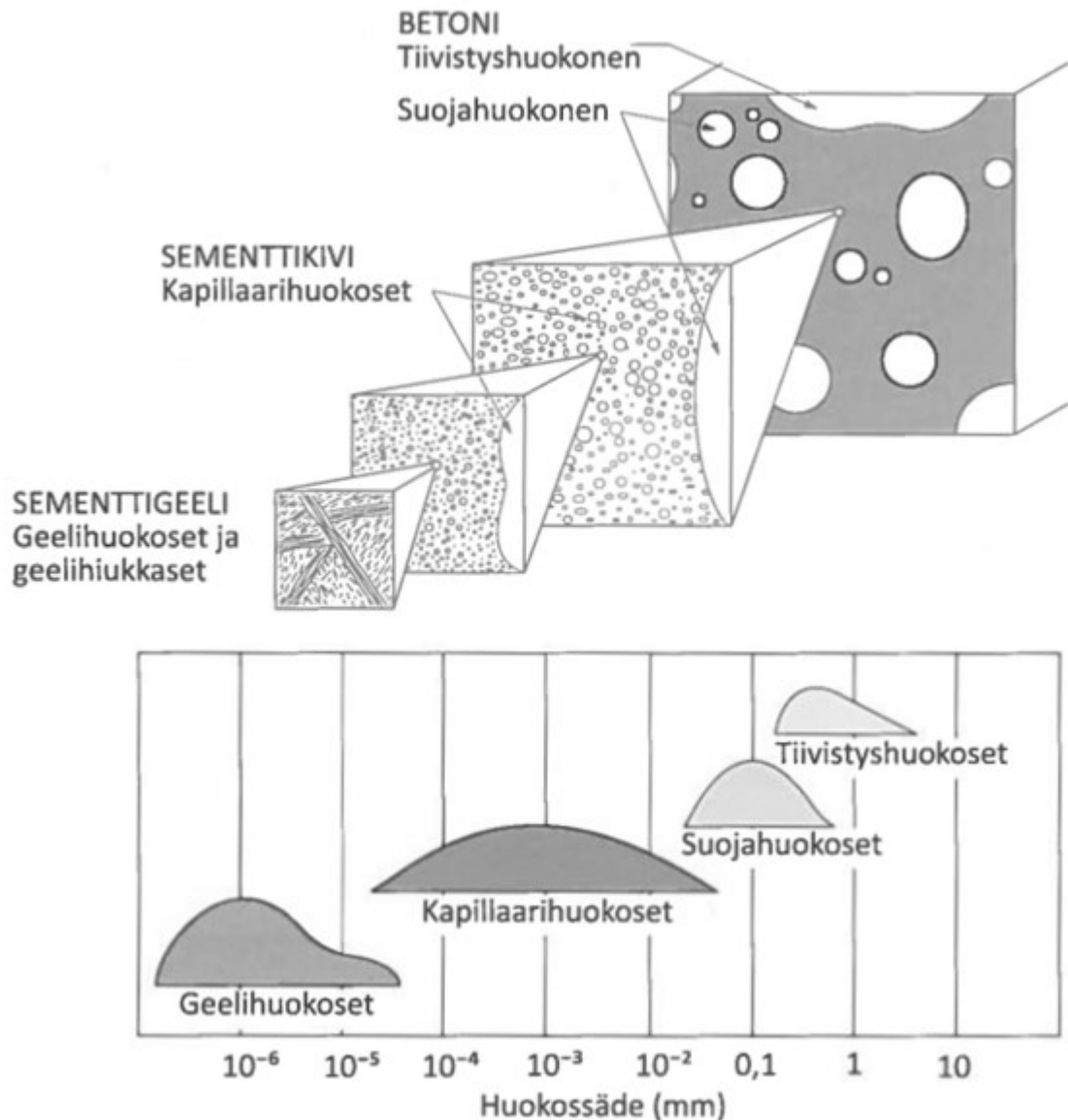
Joidenkin lisäaineiden käytöllä voidaan päästä parannuksiin betonin kemikaalikestävyydessä. Yleisellä tasolla tarkasteltuna kemikaaleja kestäville betoneille on matala vesi-sementtisuhde ja tiiviyn saavuttamiseksi voidaan tarvita esimerkiksi notkistavia, jolloin betoni pysyy työstettävämpänä matalasta vesi-sementtisuhdesta riippumatta [8, s. 62]. Lisäaineita on käytössä seuraavia tyyppejä: notkistin, tehonotkistin tai nesteytin, pakkasenkestävyyttä parantavat huokostimet, kiihdytin, hidastin, tiivistysaine, injektioaine sekä näiden lisäksi muita hieman vähemmän tunnettuja lisäaineita [8, s. 60-61]. Lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä, mikäli ne kuuluvat lisäainestandardin SFS-EN 934 piiriin [8, s. 61]. Työssä ei tarkastella kaikkia lisäaineita tai niiden vaikutuksia, mutta kuten mainittu, erityisesti notkistavien lisäaineiden käyttö saattaa olla tarpeellista kemikaaleja kestävästä tiivistä betonia suunniteltaessa, joten niiden toimintaa esitellään lyhyesti.

Notkistavat lisäaineet toimivat sementin ja veden välillä, vaikuttaen työstettävyyteen sekä mahdollistaen pienempien vesi- ja sementtimäärien käytön betonin valmistuksessa. Notkistimilla voidaan saada aikaiseksi pienempi vesi-sementtisuhde ja tiiviimpi betoni. Notkistavia lisäaineita on notkistimia ja tehonotkistimia. Notkistimilla saadaan noin 5 – 15 % vedenvähennys ja tehonotkistimilla noin 12 – 30 % vedenvähennys betonin työstettävyyden heikentymättä. Notkistimia voidaan käyttää myös parantamaan pelkästään betonin työstettävyyttä vaikuttamatta vesi-sementtisuhteeseen. Tyypillisimmät käytössä olevat notkistimet ovat polykarboksylaattipohjaisia. Notkistinten tyypillinen annostus on 0,3 – 1,0 % sideaineen kokonaismäärästä. [8, s. 62]

## 2.6 Betonin huokosrakenne

Betonin hydrataation aikana muodostuva sementtikivi muodostaa sisäänsä erilaisia huokosia eli tyhjiä ilman tai veden täyttämiä tiloja betonin mikrorakenteessa. Yhdessä huokokset muodostavat verkoston betonin sisässä, jota kutsutaan betonin huokosrakenteeksi. Betonin huokokset heikentävät kovettuneen betonin lujuutta ja huokosjakaumalla onkin oleellinen merkitys betonin lujuuden kannalta [2]. Betonin huokoisuutta lisääviä tekijöi-

tä ovat vesi-sementtisuhteen kohoaminen, betonin puutteellinen tiivistäminen ja jälkihoito sekä betonimassan koostumus [3, s. 69]. Betonissa on lukuisia eri huokostyyppjä: geelihuokosia, kapillaarihuokosia, supistumishuokosia, suojahuokosia ja tiivistys-tyhuokosia [8, s. 81]. Betonin eri huokosia on havainnollistettu kuvassa 6.



**Kuva 6.** Betonin sisäisen rakenteen kaaviokuva. Kuvan mitat ovat huokostyyppin huokossäteitä. [8, s. 82]

Betonin huokosten synty ja huokosrakenteen koostumus riippuu vahvasti betonin vesi-sementtisuhteesta, kuten on havainnollistettu luvun 2.1.1 kuvassa 1. Kapillaarihuokoset ovat ketjuuntuneiden sementtipartikkeleiden väliin jääviä suurempia vesitäytteisiä tiloja [8, s. 81]. Vesi-sementtisuhteen ollessa betonin loppulujuuden kannalta ihanteellinen 0,4, kapillaarihuokosia ei muodostu betoniin, mutta vesi-sementtisuhteen kasvaessa, kapillaarihuokosten määrä betonissa kasvaa nopeasti suhteessa vesi-sementtisuhteeseen [8, s. 81]. Vesi-sementtisuhteen ollessa yli 0,7 betoniin muodostuu käytännössä yhtenäinen kapillaarihuokosten verkosto [8, s. 83], joka mahdollistaa haitallisten aineiden

kulkeutumisen betonin sisälle pienentämällä betonin tiiviyyttä [5, s. 21], eikä betoni ole tällöin veden eikä kemikaalin pitävää. Korkeilla vesi-sementtisuhteilla betoni vaurioituu jäätymis-sulamisrasituksen alaisena helposti, milloin betonin yleinen kemiallinen kestävyys huononee merkittävästi [5, s. 20-21]. Näytteistä kyetään määrittämään betonin huokosmäärä sekä suojahuokosten määrä, pinta-ala sekä huokosjako [8, s. 84]. Notkistavia lisäaineita voidaan käyttää vesi-sementtisuhteen pienentämiseksi [8, s. 62].

Geelihuokokset ovat betonin pienimpiä huokosia. Geelihuokosia ovat normaalisti veden täyttämiä. Pienen tilavuutensa vuoksi niissä oleva vesi liikkuu hitaasti eikä jäädy. Geelihuokosia muodostuu sementtigeeliin, joka on täynnä niitä. Geelihuokosten osuus sementtigeelin kokonaistilavuudesta on 25 – 30 % luokkaa. [8, s. 81]

Kapillaarihuokokset eivät ole toivottuja. Kapillaarihuokokset ovat haitallisia betonille, sillä vesi pääsee niiden avulla imeytymään betoniin kapillaarisesti sekä liikkumaan ja jäätyämään betonin sisässä. Kapillaarisen vedenliikkeen myötä betoniin saattaa imeytyä haitallisia aineita, kuten erilaisia suoloja sekä klorideja. Betonia suunniteltaessa kapillaarihuokosten määrä tulee minimoida mahdollisuuksien mukaan. [8, s. 84]

Veden ja sementin reagoidessa, reaktiotuotteina muodostuvien yhdisteiden (kuten C-S-H-geeli ja CH) tilavuus on pienempi kuin lähtöaineiden. Tilavuuden pieneneminen aiheuttaa sementtikiveen supistumishuokosia, jotka ovat sisältä tyhjiä. Supistumishuokosia on noin 25 % kemiallisesti sitoutuneen veden tilavuudesta. [8, s. 84]

Suojahuokokset ovat ilmatäytteisiä huokosia, joiden tarkoitus on pääasiassa parantaa betonin pakkasenkestävyyttä. Suojahuokosten osuus betonissa on noin 2,5 – 8 % tilavuudesta ja sementtikivestä noin 20 %. Suojahuokosten koko on 0,01 – 0,8 mm luokkaa ja huokosjako on noin 0,2 mm. Lyhyt huokosjako varmistaa sen, että jäätymissykliden aikana vesi virtaa kapillaarihuokosista ilmahuokosiin veden aiheuttaman paineen ollessa korkea. Veden sulaessa se virtaa takaisin kapillaarihuokosiin ja veden kulkeutuminen eri huokosten välillä on edellytys pakkasenkestävälle betonille. [8, s. 84]

Betonin tiivistyshuokokset syntyvät erityisesti valun aikana muottia vasten olevilla pinnoilla. Tämä johtuu ilman ja veden kerääntymisestä tärytyksen aikana muotin ja betonin rajapinnoille. Betonin koko huokosrakennetta voidaan analysoida ottamalla näytteitä kovettuneesta betonista. [8, s. 84]

## 2.6.1 Huokosvesi

Betonin huokosvesi on betonin toiminnan kannalta oleellinen betonikokonaisuuden osa-alue. Luvun 2.1.1 kuvassa 1 havainnollistetaan geelihuokosissa sitoutuneen veden määrää eri hydrataatioasteilla ja erilaisilla vesi-sementtisuhteilla. Huokosvesi on vettä, johon on liuennut eri aineiden ioneja. Huokosveden korkea pH-arvo johtuu betonin kalsiumhydroksidista ja se mahdollistaa betoniterästen passivoitumisen, eli estää betoniterästen ruostumisen [8, s. 108]. Mikäli passiivikalvo rikkoontuu karbonatisoitumisen tai kloridien vaikutuksesta, betonin betoniteräksiä suojaava vaikutus katoaa [8, s. 108].

Huokosveden pH-arvon muuttuminen happamammaksi rikkoo passiivikalvon ja altistaa betoniteräksiset ruostumiselle [31].

Huokosvesi koostuu erilaisista veteen liuenneista ioneista ja niiden pitoisuuksista [2]. Hydrataation eri vaiheissa veteen liukenee ioneja ja niiden pitoisuudet vaihtelevat hydrataation vaiheen mukaan [2]. Tärkeimpiä ioneja ovat kalium- ( $K^+$ ), natrium- ( $Na^+$ ) ja hydroksidi-ionit ( $OH^-$ ), mitä huokosvesi pääasiassa sisältää noin vuorokauden kuluttua hydrataatiosta [2] [11]. Muita merkittäviä ioneja ovat kalsiumioni ( $Ca^{2+}$ ) ja sulfaatti-ioni ( $SO_4^{2-}$ ) [11].

Huokosveden alkalipitoisuus on voimakkaasti riippuvainen koko sementin alkalipitoisuudesta. Seosaineiden käyttö betonissa yleisesti madaltaa betonin alkalipitoisuutta, sillä seosaineet vapauttavat alkaleita betoniin portlandsementtiä hitaammin. Pozzolaaniset seosaineet sitovat enemmän kalsiumia, joka johtaa suurempaan vaadittavaan alkalin määrään C-S-H-geelissä. Silikan käyttö vähentää betonin emäksisyyttä seosaineista eniten. [32]

## 2.7 Betonin lujuus- ja tiiviysominaisuudet

Kovettuneen betonin tärkeimmät ominaisuudet ovat lujuus sekä säilyvyys erilaisten rasitusten alaisena. Säilyvyysominaisuudet suojaavat betonirakenteelta erilaisilta rasituksilta, kuten pakkaselta, pakkas-suolarasitukselta sekä muodonmuutoksilta. Betonin koostumus vaikuttaa merkittävästi betonin huokosrakenteeseen, joka suoraan vaikuttaa betonin lujuuteen ja tiiviyteen, jota usein käytetään indikaattorina sekä lujuus- että säilyvyysominaisuuksista. Sekä lujuus että tiiviys yleensä paranevat vesi-sementtisuhteen laskiessa. Betonin tiiviys tarkoittaa yleensä suoraan korkeamman lujuusluokan betonia ja betonin ollessa tiivistä, haitallisten aineiden tunkeutuminen betoniin vaikeutuu. Betonin tiiviyden parantuminen tarkoittaa myös betonin huokoisuuden pienentymistä, mikä parantaa muita säilyvyysominaisuuksia pakkasenkestoa lukuun ottamatta. [8, s. 69,84]

Betonin tiiviyteen vaikuttavat vesi-sementtisuhteen ja betonin huokoisuuden lisäksi sementti- ja kiviainespartikkeleiden pakkautuminen tarpeeksi tiiviisti. Suuremmalla sementtimäärällä saadaan aikaiseksi tiiviimpi betonirakenne. Kuten luvussa 2.4 käsiteltiin, sementin sideainetyyppi vaikuttaa betonin tiiviyteen huomattavasti. Betonin lujuus muodostuu hydrataation reaktiotuotteista, erityisesti C-S-H-geelin vaikutuksesta [1]. Betonin puristuslujuus on kovettuneen betonin tärkein yksittäinen ominaisuus [8, s. 84], vaikkei se suoranaisesti vaikutakaan tässä työssä käsiteltävään kemialliseen kestävyys-teen. Betonin puristuslujuuden kautta pystytään määrittelemään monia muita keskeisiä betonin ominaisuuksia [8, s. 84]. Betonin vetolujuus on suuruusluokaltaan alle 10 % betonin puristuslujuudesta [8, s. 84]. Vetolujuus täytyy tuntea, mikäli suunnitellaan raudoittamattomia betonirakenteita tai tarkastellaan betonirakenteen halkeilua [8, s. 84].

Betonin rakennetekninen toiminta perustuu ominaisuuteen kestää suuria puristusrasituksia. Betonin eri lujuuslaadut lajitellaan lujuusluokkiin niiden puristuslujuuden mukaisesti. Puristuslujuus tarkastellaan yleensä 28 vuorokauden iässä ja lujuus määritetään stan-

dardien mukaisesti lieriö- tai kuutiokokeen avulla. Kokeesta saadaan betonin lujuusluokka, jossa ilmoitetaan sekä lieriö- että kuutiolujuus, kuten betonin C25/30 lieriölujuuden ominaisarvo on 25 MN/m<sup>2</sup> (tai 25 MPa) ja kuutiolujuuden ominaisarvo on 30 MN/m<sup>2</sup>. Betonirakenteen lujuus on normaalisti rakenteen alaosissa suurempi kuin yläosissa, koska alaosa tiivistyy paremmin painovoiman vaikutuksesta. [8, s. 85,88]

Betonirakenteiden vetolujuus on noin 10 % puristuslujuudesta, eikä monenkaan betonirakenteen mitoitus perustu sen vetolujuuden hyödyntämiseen, koska betoniteräksiä käytetään vastaanottamaan rakenteeseen kohdistuvat vetojännitykset. Tärkein vetolujuuteen liittyvä ilmiö on betonin halkeilu. Halkeama betonissa merkitsee aina betonin vetolujuuden ylittymistä, joko ulkoisten kuormien tai sisäisten jännitysten johdosta. Betonirakenteen halkeilu on normaalia, mutta suunnittelijan ja rakentajan tulee hallita halkeamien muodostumista. [8, s. 89]

### 2.7.1 Betonin läpäisevyys

Betonin läpäisevyys on eräs betonin tärkeimmistä ominaisuuksista betonin käyttöiän kannalta. Betonin läpäisevyydellä tarkoitetaan useimmiten betonin vedenläpäisevyyttä. Betonin vesitiiviydelle ei ole määritelty yhteisesti sovittua testausmenetelmää, joten vesitiiviys voidaan määritellä standardin SFS-EN 206 mukaan epäsuorasti betonin koostumuksen raja-arvona [25]. Kemikaalikestävyys kannalta on syytä tutkia nesteenläpäisevyysominaisuuksien lisäksi kaasujen läpäisevyyttä, sillä teollisuuden kemikaalit esiintyvät välillä myös kaasumaisessa muodossa [3, s. 53]. Betonin vauriomekanismeista monet riippuvat suoraan betonin tiiviyydestä.

Sementin hydrataation (eli hydrataatioasteen kasvaessa) edetessä betonin lujuus kasvaa ja tiiviys paranee huokoisuuden vähentyessä useiden vuosien ajan [2]. Betonin tiiviys paranee vesi-sementtisuhteen pienentyessä ja tiiviys usein vaikuttaa suoraan siihen, miten haitalliset aineet pystyvät tunkeutuvat betoniin [8, s. 69]. Nämä molemmat vaikuttavat virtausreittinä toimivien kapillaarihuokosten määrään luvun 2.1.1 kuvan 1 mukaisesti.

Nestemäiset aineet voivat päästä betonin pinnan sisään monen eri kulkeutumismekanismin avulla. Näitä ovat esimerkiksi läpäisy, diffuusio, kulkeutuminen ja konvektio [33]. Normaaliolosuhteissa kulkeutumismekanismeja on vain yksi vaikuttamasta kerrallaan, mutta esimerkiksi meren rannalla sijaitsevilla betonirakenteilla useampi mekanismi saattaa vaikuttaa samanaikaisesti betonirakenteeseen [33]. Kaikissa kulkeutumismekanismeissa betonin huokoisuus, joka on riippuvainen kapillaarihuokosverkoston jatkuvuudesta, on merkittävin ominaisuus vieraan aineen tunkeutuessa betoniin [33]. Nestemäisten aineiden tunkeutumiseen normaalisti liittyy jonkinasteista vedenpainetta, joka auttaa aineita tunkeutumaan betoniin sen mikrohalkeamien kautta [33].

Betonin läpäisevyyteen vaikuttaa pääasiallisesti betonin huokoisuus ja huokosverkoston jatkuvuus sekä betonin sisäiset mikrohalkeamat erityisesti sementtipastan ja kiviaineksen rajapinnassa. Betonin huokoisuuteen vaikutetaan betonin koostumusta valittaessa ja

se riippuu myös betonin hydrataatioasteesta. Betonin sisäiset mikrohalkeamat riippuvat betoniin aiheutuneista jännityksistä ja pakkovoimista joko mekaanisen kuormituksen tai kemiallisen rasituksen aiheuttamana. [34]

Betonin läpäisevyys lisääntyy huomattavasti, mikäli betonirakennetta kuormitetaan merkittävällä kuormalla noin vuorokauden ikäisenä (tutkimuksessa [34] ~ 40 % sen hetkisestä puristuslujuudesta) liian aikaisessa vaiheessa. Toisaalta vastaava kuormitus voi tiivistää betonin rakennetta ja pienentää läpäisevyyttä betonin ollessa kolmen vuorokauden ikäistä. Kuormituksen tapahtuessa yhden ja kolmen vuorokauden kohdalla, myös kolmen vuorokauden kohdalla tapahtunut kuormitus lisäsi betonin läpäisevyyttä huomattavasti, voimistaen aiempaa vauriota. [34]

Kuormituksen alaisena olevan betonirakenteen läpäisevyydellä näyttäisi olevan kynnysarvo, jonka alittava kuormitus vähentää betonirakenteen läpäisevyyttä kuormituksen vaikuttaessa, kun taas kynnyksen ylittävä kuormitus tekee betonista läpäisevämpää. Tämä kynnysarvo riippuu läpäisevästä aineesta ja sen on arvioitu olevan noin 30 % puristuslujuudesta veden läpäisevyydelle ja 80 % kaasujen läpäisevyydelle. Pysyvä kuormitus on parempi kuin jaksoittainen kuormitus betonin läpäisevyysominaisuuksien kannalta. Jaksottaisessa kuormituksessa betonin läpäisevyys on pienempää kuormituksen aikana kuin ilman sitä, kunhan kuormituksen kynnysarvo ei ole ylittynyt. Kuitubetonilla on todettu olevan läpäisevyyttä pienentäviä vaikutuksia betonin ollessa kuormitettuna, koska siihen syntyy pienempiä halkeamia. [33]

Betonin sisäisillä mikrohalkeamilla on vastaavanlainen halkeamaleveyden kynnysarvo, jonka alittuessa halkeamilla ei ole merkittävää vaikutusta betonin läpäisevyysominaisuuksiin. Tämä halkeamaleveyden kynnysarvo on noin 50 – 100 µm luokkaa, jota suuremmat halkeamat nopeasti lisäävät betonin läpäisevyyttä. Halkeamien pituus ei vaikuta betonin läpäisevyyteen. [33]

Betonin kaasunläpäisevyys (hapen) kasvaa vesi-sementtisuhteen kasvaessa kaikilla työssä käsitellyillä sideainetyypeillä (tavallinen portlandsementti, lentotuhka, masuunikuona ja silika) [35]. Paras eli pienin kaasunläpäisevyys on jauhetusta granuloidusta masuunikuonasta valmistetulla sementillä [35].



### 3. BETONIA KEMIALLISTESTI RASITTAVAT REAKTIOT SEKÄ KEMIKAALIEN RASITUKSET

Teollisuuden tehtaissa ja tuotantolaitoksissa käsitellään lukuisia erityyppisiä kemikaaleja sekä aineita, jotka voivat päästä kosketuksiin betonin kanssa esimerkiksi virtaamalla betonikanaaleissa tai roiskumalla astiasta betonipinnalle. Tämän luvun tavoitteena on tunnistaa teollisuudessa esiintyviä suurimpia kemikaaliryhmiä yleisellä tasolla, sekä tarkastella miten niiden kontakti betoniin rasittaa betonia. Lisäksi tarkastellaan luonnollisesti esiintyviä betonin kemiallisen rasituksen ilmiöitä eli alkali-kiviainesreaktiota sekä myöhäisvaiheen ettringiitin muodostumista; ne ymmärretään betoniteknikassa paremmin ja niiden pohjalta on helpompaa käsitellä teollisuusrakentamisen erikoistapauksia.

Tyypillisiä kohteita teollisuusrakentamisessa kemikaalirasitukselle ovat betonipinnat, jotka voivat olla kosketuksissa kemikaalien kanssa. Teollisuusrakennukset ovat tapauskohtaisia ja jokaisessa pitää miettiä minkälaista kemikaalirasitusta niiden betonirakenteisiin voi kohdistua joko suoranaisesti tai roiskeina. Tyypillisiä tapauksia ovat esimerkiksi teollisuuslaitosten ja varastorakennusten betonilattiat, säiliöt, betonialtaat, varoaltaat, kanaalit, viemärit, koneperustukset, merivesirakenteet sekä maanalaiset kemiallisesti rasittamat perustukset [5, s. 23-28,66-81] [6] [36] [37]. Korkeissa rakennuksissa kaasut, kuten polttoaineiden poltosta syntyneet yhdisteet vaurioittavat rakennuksen yläosan rakenteita [12, s. 339].

Betonille kemialliset rasitukset aiheuttavat joko sisäistä tai ulkoista korroosiota [8, s. 130], riippuen vaikuttavasta kemikaalista. Betonin ulkoisessa kemiallisessa rasituksessa betonin kanssa kontaktiin joutuvat haitalliset aineet reagoivat betonin osa-aineiden kanssa, vaurioittaen betonia [8, s. 130]. Kaikista aggressiivisimmat aineet, kuten hapot, liuottavat betonin yhdisteitä pois betonista [8, s. 130], jolloin betonin rakenne tuhoutuu täysin. Sisäisestä kemialliseksi korroosiota betonille voivat aiheuttaa betonin kiviaineksen sisältämä hienoaines, alkali-kiviainesreaktiot ja betonin osa-aineiden sisältämien sulfaattien aiheuttamat paisumisreaktiot ettringiitin muodostuessa [8, s. 130].

Betonin kemiallinen korroosio tapahtuu yleisimmin aineiden kulkeuduttua betoniin veden mukana. Korroosion voimakkuutta lisäävät liuoksen aiheuttama paine tai virtaus, korkea lämpötila sekä betonin ajoittainen mahdollisuus kuivumiseen, jolloin aineet voivat päästä rikastumaan betonirakenteeseen, väkevöittäen rasitusta. Myös vähän kalsiumioneja sisältämä pehmeä vesi (kuten sade- ja lumensulamisvesi) saattaa hajottaa tai liuottaa betonin kalsiumyhdisteitä. [8, s. 131]

Betoni kestää erilaisia rasituksia hyvin ja betonin kestävyyttä aggressiivisissa ympäristöissä on tutkittu monien vuosikymmenten ajan [12, s. 299]. Näiden tutkimuksen avulla on saatu kehitettyä sementtejä, joiden kestävyys kemikaalirasituksia vastaan on paran-

tunut ja on saatu todistettua korkealaatuisen betonin asema kemikaalirasitusten torjumisessa [12, s. 299]. Korkealaatuinen betoni ei tarkoita välttämättä betonin korkeaa mekaanista lujuutta, vaan voi myös tarkoittaa betonin valmistuksessa käytettyjä ainesosia ja niiden ominaisuuksia, jotka auttavat betonia kestäämään siihen kohdistuvan kemikaalihyökkäyksen [12, s. 299]. Oikealla sementin sideaineen tyyppin valinnalla voidaan tietyissä tapauksissa välttää betoniin kohdistuvan kemikaalihyökkäyksen aiheuttamat kemikaalireaktiot [8, s. 131], tosin tämän tehokkuus riippuu sideaineista ja betoniin vaikuttavasta kemikaalista. Tästä voidaan pitää esimerkkinä sulfaatinkestävää sementtiä, joka nimensä mukaisesti on suunniteltu kestäämään erilaiset betoniin kohdistuvat ulkopuoliset sulfaattihyökkäykset. Yleisesti tunnistettu fakta betonin kemikaalikestävyydestä kuitenkin on, että mitä vähemmän läpäisevää betoni on, sitä parempi sen kemikaalikestävyys on [8, s. 131] [12, s. 299]. Tämä usein käytännössä tarkoittaa korkeamman lujuusluokan betoneita sekä sementin koostumuksen ainesosien valintaa kemikaalinkestäviä betonirakenteita suunniteltaessa. Kemikaalinkestäviä betoneita tehtäessä valunainen tiivistys sekä jälkihoito ovat erityisen tärkeitä, sillä ne hidastavat sekä haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin että haitallisten kemiallisten reaktioiden tapahtumista [8, s. 131].

Kemiallisten tekijöiden vauriot ilmaantuvat useimmiten fysikaalisena vaurioitumisena betonissa. Kemiallisesti aiheutuneita vauriotyyppejä ovat esimerkiksi huokoisuuden ja läpäisevyyden kasvu, lujuuden heikkeneminen, halkeilu sekä lohkeilu. Kemialliset ja fysikaaliset vaurioprosessit voivat tapahtua ja usein tapahtuvatkin samanaikaisesti, mahdollisesti edistään toinen toisiaan. Taulukossa 11 on listattu yleisiä betonin kemiallisia vauriotekijöitä ja niiden vauriomekanismeja. [8, s. 131]

**Taulukko 11.** Betonin kemiallisia vauriotekijöitä ja niiden vauriomekanismit sekä vaikutus betonirakentamisessa. [8, s. 131]

Kemialliset vauriotekijät	Mekanismi	Vaikutus
Pehmeä vesi	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	neutraloituminen	teräskorroosion aktivoituminen
Happamat kaasut: hiilidioksidi, rikki- ja typpioksidit	neutraloituminen karbonatisoituminen	teräskorroosion aktivoituminen mikrorakenteen epäedullinen muuttuminen
Kloridit	passiivikalvon rikkoutuminen	teräskorroosion aktivoituminen
Aktiivitilassa olevat terästangot + happi + vesi	korroosio	terästankojen paisuminen, pinta-alan ja tartunnan menetys
Jännitys, kloridit	jännityskorroosio (vetyhaurastuminen)	jänneraudoitteiden katkeaminen
Sulfaatit, merivesi, maaperä	kiteytymispaine kemialliset muutokset	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, silikaattikiviaines	alkali-piihapporeaktio alkali-silikaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, karbonaattikiviaines	karbonaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen

Kuten luvussa 2 mainittiin, betoni on emäksinen aine ja sen pH on normaalilla kovettuneella betonilla noin 12 – 13,5. Tämä emäksisyys johtuu kalsiumhydroksidista (CH) betonin hydratoituneessa sementissä. Jotkin kemikaalit vaikuttavat betonin pH-arvoon reagoimalla kalsiumhydroksidin kanssa. Mikäli pH-arvo putoaa noin yhdeksään, betonin emäksisyys lakkaa suojaamasta betoniteräksiä, jotka tällöin ruostuvat [3, s. 53]. Betonin emäksisen luonteen johdosta happamat aineet neutraloituvat betonin huokosveden kanssa reagoidessaan, muodostaen suoloja. Kiteytyneen suolarasituksen ja/tai betoniin vaikuttavan taivutusrasituksen on todettu lisäävän kemikaalien aiheuttamaa räsitystä betonissa suurentamalla halkeamaleveyksiä [38].

Tässä luvussa käsitellään ryhmittäin erilaisia kemiallisia vauriotekijöitä. Betoniin vaikuttavia vauriotekijöitä on sekä sisäisiä että ulkoisia. Merkittävimmät sisäiset vauriotekijät ovat alkali-kiviainesreaktio sekä ettringiitin muodostuminen kovettuneessa betonissa, joita käsitellään luvuissa 3.1 ja 3.2. Betonin ulkoiset kemialliset vauriotekijät ovat teollisuusrakentamisen erityisolosuhteiden kannalta usein merkittävämpiä ja niitä on tässä työssä jaettu ryhmiin seuraavasti: hapot, kasvisöljyt ja –rasvat sekä eläinöljyt ja –rasvat, emäkset, kloridit, sulfaatit, veden kemikaalirasitukset, maaöljyt sekä kaasut. Ulkoisia kemiallisia vauriotekijöitä käsitellään luvuissa 3.3 – 3.10. Kemiallisten vauriotekijöiden vauriomekanismeja esitellään pääasiassa luvussa 4, mutta myös tämän luvun asioita käsitellessä niitä tuodaan esille niiden ollessa tyypillisiä tietyille kemikaaliryhmälle.

### 3.1 Alkali-kiviainesreaktio

Alkali-kiviainesreaktio on tunnettu ilmiö betonin kiviaineen kemiallisesta reaktiivisuudesta [22, s. 28] [39] [40]. Alkali-kiviainesreaktioita on kolmenlaisia: alkali-silikaattireaktio, alkali-piihapporeaktio sekä alkali-karbonaattireaktio, joista alkali-silikaattireaktio (engl. alkali-silica reaction, ASR) on yleisin [8, s. 134].

Alkali-silikaattireaktiossa kiviaineen silikaattiset yhdisteet reagoivat betonin huokosvedessä esiintyvien alkalihydroksidien kanssa, kasvattaen kiviaineen tilavuutta (paisuttavat) sekä kuivuttaen betonin pintakerrosta, mikä puolestaan johtaa betonin halkeiluun, lujuuden menetykseen ja lopulta betonirakenteen hajoamiseen [8, s. 134] [22, s. 28] [39] [40]. Pääasialliset huokosveden reagoivat komponentit ovat voimakkaasti emäksiset natriumhydroksidi (NaOH, lipeä) sekä kaliumhydroksidi (KOH) [12, s. 138]. Alkali-kiviainesreaktion aiheuttama tilavuudenmuutos voi olla yli 0,5 %, mistä johtuen rakenne halkeilee helposti [41, s. 25]. Reaktio vaatii tapahtuakseen runsaasti alkaleja sisältävän sementin, heikosti alkaleja kestävästä kiviainesta (esimerkiksi tietyt kvartsit [12, s. 964]) sekä riittävän korkean betonin kosteuspitoisuuden [8, s. 134].

Korkean pH:n ( $> 12,5$ ) ympäristöissä jotkin mineraalit, kuten huonosti kiteytyneet silikaattimineraalit tai erilaiset piioksidit, ovat epävakaita ja voivat liueta betonin kiviaineksesta huokosveteen. Joistakin liuenneista kiviaineksista saattaa liueta lisää alka-

leita huokosveteen, mutta tämän ei ole havaittu merkittävästi vaikuttavan alkali-kiviainesreaktion aiheuttaman betonin tilavuuden laajentumiseen. Alkali-kiviainesreaktioon ei suoranaisesti osallistu alkaleita, mutta sen nimitys johtuu huokosveden alkali-ioneista, jotka hallitsevat huokosveden pH-arvoa. [42]

Suomen luonnon kiviaines on pääsääntöisesti kemiallisesti kestävä, mutta ongelmia saattaa syntyä murskattua kiviainesta käytettäessä [8, s. 135]. Ulkomailta hankittuja kiviaineita käytettäessä tulee hankkijan huomioida alkuperämaan kiviainesten ominaisuudet [22, s. 29]. Suomessa esiintyy harvakseltaan betonin vaurioitumista alkali-kiviainesreaktion seurauksena [3, s. 56], kuten esimerkiksi Rakennuslehti [43] on uutisoinut uimahallien ongelmista. Alkalireaktiiviset kiviainekset voivat aiheuttaa ongelmia teollisuusrakenteissa mikäli kemikaalit aiheuttavat kemiallisen reaktion kiviaineksessa.

Alkali-kiviainesreaktion aiheuttamaan laajenemiseen vaikuttavat kiviaineksen reaktiivisuus, reaktiivisen kiviaineksen raekoko, huokosveden alkali- ja kalsiumkonsentraatio, sementtityyppi, ympäristön lämpötila ja kosteus sekä veden läsnäolo betonissa [3, s. 56]. Betonissa oleva viruma voimistaa alkali-kiviainesreaktion aiheuttamaa tilavuuden laajentumista [44].

### 3.2 Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen

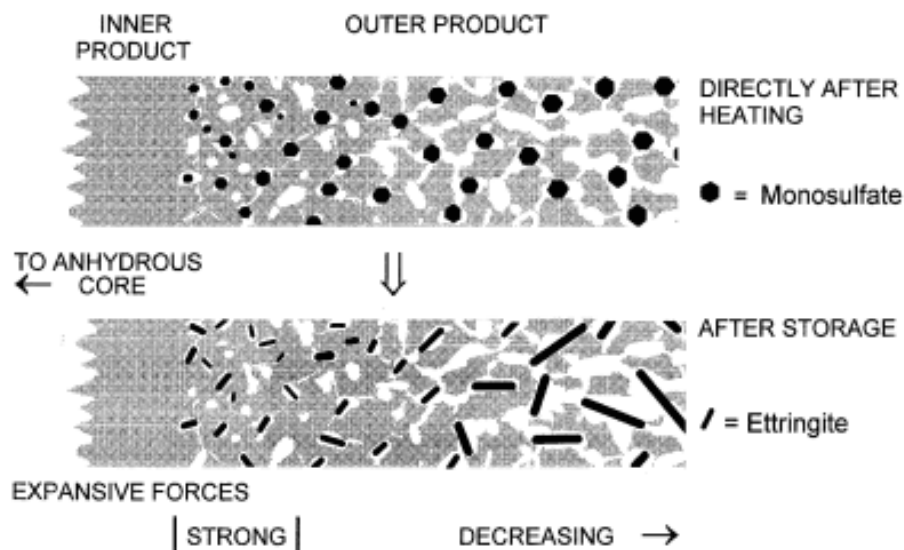
Ilmiö jota kutsutaan myöhästyneeksi ettringiitin muodostumiseksi (engl. delayed ettringite formation, DEF) altistaa betonin kemikaalihyökkäyksille mikrohalkeamien muodostumisen kautta [16] [37]. DEF tarkoittaa ettringiitin muodostumista betoniin kovettumisen jälkeen [16], jolloin se on haitallista toisin kuin hydrataation aikana muodostuva ja enimmäkseen katoava ettringiitti, jota on käsitelty luvussa 2.1.3. DEF aiheuttaa kovettuneeseen betoniin halkeilua ja rapautumista paisuttamalla betonia [2] [16] [19]. Tämän luvun asiat pätevät erityisesti korkean lämpötilan aiheuttaman reaktion kulusta, mutta myös ulkopuolisten sulfaattien muodostamana ettringiitin muodostuminen ja vaurioitumisilmiöt ovat samanlaisia. Ulkopuolisen sulfaatin aiheuttamaa ettringiitin muodostumisesta käsitellään luvussa 3.7.

DEF:n tapahtuminen edellyttää joko sisäistä tai ulkoista sulfaatin lähdettä sekä pitkäaikaista korkeaa kosteusrasitusta betonissa [8, s. 134]. Ulkoista lähdettä ei välttämättä tarvita, mikäli betoni sisältää paljon sulfaattimineraaleja, jotka reagoivat korkean lämpötilan seurauksena ja usein DEF:lla tarkoitetaan sisäisten sulfaattien aiheuttamaa reaktiota [16]. Tästä huolimatta ulkopuolisen sulfaatin päätyminen betoniin voi aiheuttaa DEF:n kaltaisia reaktioita betonissa, jolloin lopulta kovettuneeseen betoniin muodostuu ettringiittiä [8, s. 39]. DEF:n tapahtuminen vaatii betonin saavuttavan yli 70 °C [8, s. 134] lämpötilan esimerkiksi hydrataation tai lämpökäsittelyn seurauksena [16]. Hydrataatiovaiheen jälkeinen ettringiitti muodostuu C-S-H-geelin, monosulfaatin sekä huokosveden reagoiessa keskenään [16].

Betonirakenteen valamisen jälkeen, lämpökäsittelyn loppuessa monosulfaatti on sekoittunut C-S-H-geelin kanssa ja tästä muodostunut myöhäisen vaiheen ettringiitti on se-

koittuneena C-S-H-geelin seassa [16]. Ettringiitti alkaa kiteytyä muodostumisensa jälkeen, muodostaen prismaattisia tai neulamaisia kiteitä [2], jotka aiheuttavat sisäistä painetta täyttäessään huokosia ja betonin sisäisiä halkeamia, paisuttaen betonia sisältäpäin [16]. Ettringiitti täyttää betonin suojahuokosia, mikä heikentää betonin pakkasenkestävyyttä [5, s. 23]. Sementin huokosverkoston rakenne vaikuttaa DEF:n aiheuttamaan laajentumiseen [16]. Kuten kuvassa 7 on esitetty, DEF muodostuu sementin huokosiin. Tästä voidaan päätellä, että huokosverkoston ollessa jatkuva ja huokosten ollessa suuria, ettringiitti pääsee muodostumaan vapaasti eikä aiheuta merkittävää jännitystä ja täten paisumista betoniin [16].

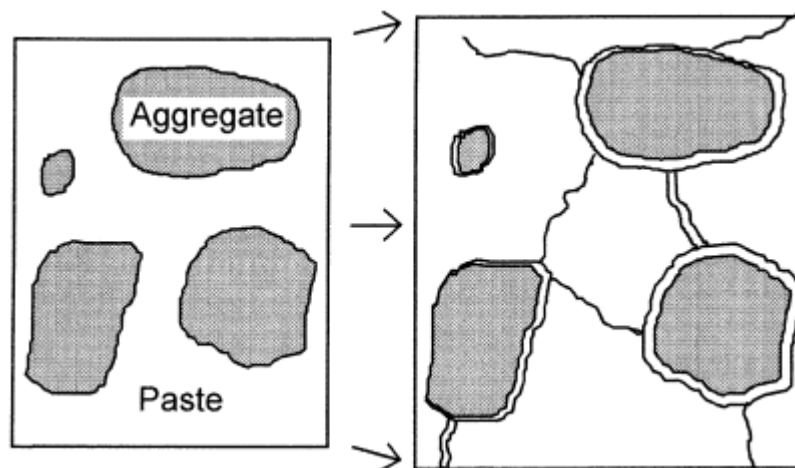
Kuvassa 7 ylhäällä esitetään lämpökäsitellyn betonin sementtipastaa ja monosulfaattikiteitä sen sisässä. Sementtipastan mikrorakenteessa on havaittavissa luvun 2.1.1 mukainen tiiviimpi sisempi alue, jolla ei ole juurikaan jatkuvaa huokosverkostoa tai mikrohalkeamia sekä ulkoinen alue, jossa monosulfaattikiteet pääsevät muodostumaan huokosissa sekä sisäisissä mikrohalkeamissa [16]. Alempana kuvassa 7 esitetään betonin jäähtymisen ja kovettumisen aikaista tilannetta, jossa monosulfaatti on muodostanut C-S-H-geelin kanssa ettringiittiä, joka pyrkii laajentumaan ja täyttämään betonin sisäisiä halkeamia ja huokosia. Ulkoinen alue harvenee mentäessä keskustasta kauemmaksi ja tämä johtaa siihen, että ulkoisen alueen sisäpinnoille muodostuvat ettringiittikiteet aiheuttavat suurimpia jännityksiä betoniin betonin tiiviimmän rakenteen vuoksi [16].



**Kuva 7.** DEF:n aiheuttaman sisäinen paisumisen mekanismi. [16]

DEF aiheuttaa betonin paisumista sisältä ulospäin ettringiitin suuren tilavuuden vuoksi, mikä aiheuttaa mikrohalkeilua betonin rakenteessa. Paisumista vahvistavat muut heikoudet betonissa, kuten erityisesti alkali-silikaattireaktio, joka on esitelty luvussa 3.1. DEF:n aiheuttamasta paisumisesta johtuvia mikrohalkeamia kiviainespartikkelien välillä esitetään kuvassa 8. Sementtipastan paisuminen aiheuttaa halkeamia sekä sementtipastan sisäisesti että kiviaineksen ja pastan rajapinnassa. Ettringiitti (sekä kalsiumhyd-

roksidi) pääsee kiteytymään uudelleen näihin paisumisesta aiheutuneisiin betonin sisäisiin mikrohalkeamiin, muttei aiheuta enempää paisumista. Sementtipastan kyllästymisaste veden suhteen vaikuttaa DEF:n aiheuttamien halkeamien syntymiseen - mitä kyllästyneempää sementtipasta on, sitä suurempia halkeamia pastassa on ja nämä valmiiksi suuret halkeamat tarjoavat paikkoja missä ettringiitti pääsee kiteytymään. DEF:n aiheuttamaan paisumiseen vaikuttaa betonin kemiallinen koostumus, sementtipastan mikrorakenne sekä betonin mikrorakenne. [16]



**Kuva 8.** DEF:n aiheuttamat mikrohalkeamat kiviainespartikkelien ympärillä. [16]

Betonin kemiallinen koostumus vaikuttaa ettringiitin muodostumiseen ja DEF:n aiheuttamaan paisumaan  $\text{SO}_3$ -pitoisuuden sekä  $\text{SO}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  -moolisuhteen kautta [16]. Sementin valmistuksessa DEF:n vaikutuksia voidaan pyrkiä estämään rajaamalla sementin  $\text{SO}_3$ -pitoisuutta sementtityypistä riippuen 3,5 - 4,0 %:iin [2] [8, s. 39]. DEF:n aiheuttamaa laajentumista voi tästä huolimatta tapahtua, mikäli sementtiin lisätään liikaa kalsiumsulfaattia tai sulfaattia tulee betoniin ulkopuolisesta lähteestä [8, s. 39]. Betonin kemiallisen koostumuksen vaikutusta ulkoisen sulfaattihyökkäyksen aiheuttamiin DEF:n kaltaisiin reaktioihin käsitellään luvussa 3.7.

Suurella osalla portlandsementeistä on korkea määrä  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :ta ja matalampi määrä  $\text{SO}_3$ :ta verrattuna pienimpiin vaadittuihin määriin. Tämänkaltaisille sementteille  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :ta sitovat ainesosat lisäävät ettringiitin muodostumista, paitsi jos ne sitovat niin suuren osan että  $\text{SO}_3$  muuttuu  $\text{SO}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  -moolisuhteen enemmistöksi. Mikäli sementillä on korkeampi  $\text{SO}_3$  pitoisuus, niin  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :n sitomisella on vastakkainen vaikutus.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :ta sitovia ainesosia sementissä ovat ainakin magnesiumoksidi ( $\text{MgO}$ ) ja hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ).  $\text{CO}_2$ :n betonissa uskotaan olevan yksi DEF:n tärkeimmistä aiheuttajista. Rauta(III)oksidia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sisältäville sulfaatinkestäville portlandsementeille DEF:n aiheuttava laajentuminen on olematonta. Pidennetty lämmitetty jälkihoito (noin 7-10 päivää) pienentää tai kokonaan estää halkeilun. Masuunikuonan sekä lentotuhkan käyttö vähentävät DEF:n aiheuttamaa laajentumista. [16]

Sementtipastan rakenteesta puhuttaessa voidaan todeta DEF:n aiheuttaman paisumisen kasvavan hydrataatioasteen kasvaessa lämpökäsittelyn lopussa, sillä tämä pienentää ka-

pillaarihuokosten määrää, kokoa sekä verkoston yhtenäisyyttä. Hydrataatioaste korreloi betonin puristus- ja vetolujuuden kanssa ja näiden lujuuksien kasvaessa myös potentiaalinen DEF:n aiheuttama paisuminen kasvaa. Aliitin ( $C_3S$ ) tai hienoaineksen lisääminen sekä vesi-sementtisuhteen pienentäminen kasvattavat lopullista paisumaa. Jälkihoidon lämpötilan ja keston kasvattaminen kasvattaa myös paisumaa. Lämpötilan kasvattaminen saattaa muuttaa sementin mikrorakennetta nostamalla hydrataatioastetta sekä tiivistämällä kuvan 7 mukaista ulompaa aluetta, jolloin ettringiitti pakkautuu tiiviimmin ja aiheuttaa jännityksiä. Korkeamman  $SO_3$  määrän käyttö betonissa kasvattaa aikaista lujuutta, mutta voi toisaalta altistaa korkealle paisumiselle. Vesi-sementtisuhteen pienentyessä paisumisnopeus pienenee, mutta lopullinen painuma saattaa nousta. Betonin mikrorakenne määrittelee miten materiaali kestää ettringiitin muodostumisen aiheuttamat jännitykset. DEF:n aiheuttama paisuminen ehjässä ja hienossa sementtipastassa on hidasta. [16]

### 3.3 Hapot

Hapot ovat betonille lähes poikkeuksetta haitallisia aineita, sillä betoni on itsessään emäksinen aine [5, s. 23] [12, s. 324]. Ne eivät reagoi kemiallisesti sementin tai hydrataatiotuotteiden kanssa, vaan yksinkertaisesti liuottavat sementtiä [5, s. 23] [12, s. 324]. Happohyökkäyksen voimakkuus perustuu hapon diffuusioon betoniin [45]. Sementin hydraattien liuetessa betoni menettää lujuusominaisuutensa (eli pehmenee) asteittain [45]. Happohyökkäys kohdistuu sementtikiven kalsiumyhdisteisiin, muuttaen ne kalsiumsuoloiksi eli hapon ja kalsiumin yhdisteiksi [46]. Kalsiumsuoloilla ei ole kalsiumhydroksidin tai kalsiumsilikaattihydraatin (C-S-H-geelin) kaltaisia lujuusominaisuuksia [8, s. 132]. Portlandiitti liukenee happohyökkäyksen alaisena ja C-S-H-geeli menettää kalkkipitoisuutensa [47]. Muodostuneet suolat ovat usein liukenevia ja täten tuhoavat betonin kovettuneen huokosrakenteen liuetessaan pois siitä [3, s. 55] [46]. Kalsiumsuolat muodostuvat betonirakenteen pinnoille sementtikiven sijaan, jolloin myös betonin sisäinen rakenne pääsee vaurioitumaan [46]. Reaktioiden nopeus riippuu syntyvän kalsiumsuolan vesiliukoisuudesta, nopeasti liukenevilla suoloilla reaktio kulkee nopeammin [3, s. 55]. Hapojen aiheuttamat vauriot ja vaurionopeus riippuu happotyypistä, hapon aggressiivisuudesta, hyökkäyksen kestosta, hapon määrästä, betonin läpäisevyydestä sekä sementin koostumuksesta, mutta lopullinen tulos jatkuvalla happohyökkäyksellä on betonin tuhoutuminen [12, s. 324]. Useimmiten määräävänä tekijänä vaurioitumisnopeudelle on muodostuneiden kalsiumsuolojen liukoisuus [46].

Happohyökkäys vaurioittaa betonin pintaa ja muodostaa syöpyneistä aineista kerroksen betonirakenteen pintaan, joka suojaa sisempiä kerroksia betonirakenteesta [48]. Betonin kyky kestää happohyökkäyksiä perustuu tämän kerroksen kykyyn suojata betonirakenteen sisempiä ehjiä kerroksia jatkuvalta hyökkäykseltä, eikä niinkään vaurioitumattoman betonin ominaisuuksista [47] [48]. Happohyökkäyksen vaurioittama osuus betonista on usein värjäytynyt vaalean ruskeaksi [47].

Happohyökkäyksen voimakkuuteen vaikuttavat betonin läpäisevyys, ympäristöolosuhteet, käytetty sementtityyppi sekä betonin ja hapon reaktiossa muodostuneen kalsium-

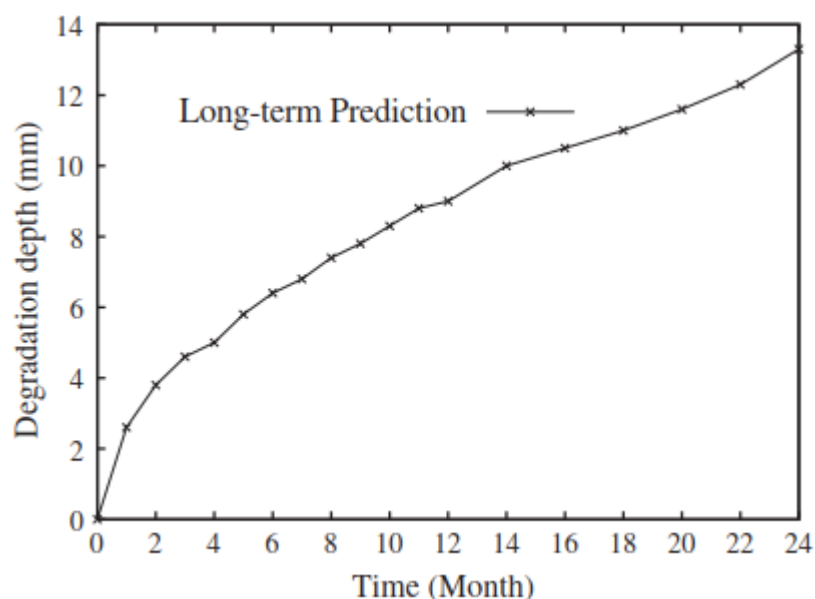
suolan liukoisuus [12, s. 324]. Kalsiumsuolojen muodostumisen takia portlandsementit ovat alttiimpia happohyökkäyksille kuin pozzolaaniset sementit sekä ma-suunikuonaseimentit [12, s. 324], jotka kestävät happohyökkäyksiä paremmin pienemmän kalsiumin määrän takia [49]. Erityisen rasittavat olosuhteet ovat betonilla, jossa yhdellä sivulla on betonille painetta aiheuttavaa hapanta vettä ja toisella ilmaa [12, s. 324]. Tällöin hapan vesi pyrkii tunkeutumaan betonin lävitse ilmatilaan [12, s. 324]. Päästessään betonin sisään happamat yhdisteet neutraloivat betonin emäksisyyttä, poistaen betoniteräksiä suojaavaa vaikutusta ja altistaen ne korroosiolle [8, s. 131].

Happohyökkäys kohdistuu normaalisti betonin pintaan, mutta betonin ollessa hyvin läpäisevää, happo pääsee tunkeutumaan siihen ja voi vaurioittaa betonia syvemmältä. Aggressiivisen happohyökkäyksen torjumisessa eri betonilaaduilla on vain pieniä eroja. Aggressiivisilta hapoilta betonirakenne voidaan suojata vain käyttämällä haponkestävää pinnoitetta. [8, s. 133]

Happojen aiheuttama vauriotyyppi riippuu siitä, onko kyseessä staattinen tilanne, vai virtaako happoliuos, mikä lisää vaurioitumisnopeutta [45]. Olettaen hapon olevan vaurioittavaa tyyppiä ja tarpeeksi voimakasta liuosta, kuten rikkihappoa jonka pH on 1, staattisessa tilanteessa muodostuu huokoinen kipsistä ja silikaatista koostuva geelikerros, jolla ei käytännössä ole lujuusominaisuuksia [45]. Virtaustapauksessa vastaava kerros liukenee pois sitä mukaa, kun betoni vaurioituu, ja betoni vaurioituu syvemmältä nopeammin [45]. Happojen betonia turmeleva vaikutus kohdistuu ensisijaisesti betonin pintaan, jossa betonirakenteen rakenne turmeltuu kokonaan [8, s. 133].

Happojen aiheuttama vaurioitumisnopeus muuttuu betonin huokoisuuden mukana, huokoisemmilla betoneilla vaurioituminen on nopeampaa kuin tiiviimmillä betoneilla. Happohyökkäyksen korroosiosyvyys nousee lineaarisesti ajan neliöjuurena. Kuvassa 9 havainnollistetaan eräässä [45] tutkimuksessa tapahtunutta rikkihapon tunkeutumaa betoniin, betonin ollessa jatkuvan altistuksen alaisena. Mikäli betonissa on karbonatisoitunut kerros, se hidastaa happohyökkäyksen aiheuttamaa vaurioitumista. [45]





**Kuva 9.** Rikkihapon tunkeutumisvyvyys betoniin betonisessa viemäriputkessa pitkän tarkastelujakson aikana. [45]

Happamia liuoksia esiintyy luonnossa pohjavesiin (ja jätevesiin) sekoittuneina sekä maaperässä [37]. Teollisuuden rakenteissa käytön aikana happoja voi joutua roiskeina, vuotoina tai joskus tarkoituksellisesti betonipinnoille [37]. Teollisuudessa tavallisia happoja ovat rikki-, suola- ja typpihappo, sekä elintarviketeollisuudessa etikka-, muurahais-, maito- sekä hiilihapot [8, s. 132]. Happoja on kahta pääryhmää, orgaanisia ja epäorgaanisia happoja. Ne vaikuttavat betoniin eri tavoin ja saman ryhmän sisällä olevat hapot keskenään eri tavalla [12, s. 324-338].

### 3.3.1 Orgaaniset hapot

Orgaaniset hapot ovat luonnossa esiintyviä happoja. Orgaanisia happoja löytyy laajasti eri puolilta luontoa, kuten kasveissa sekä kasvien ja eläinten hajoamistuotteissa [12, s. 328-329]. Orgaanisia happoja on enemmän kuin epäorgaanisia happoja ja niiden vaikutusta betoniin on vaikeampaa ennustaa [12, s. 328]. Määriteltäessä orgaanisten happojen vaikutusta betoniin, ei voida määritellä yksinkertaisia ohjesääntöjä hapon vahvuuden tai pH:n perusteella [12, s. 328]. Tärkeimpiä ominaisuuksia ovat orgaanisen hapon liukoisuus veteen sekä hapon ja kalsiumhydroksidin (CH) reaktiossa syntyvien kalsiumsuolojen liukoisuus [12, s. 328] [46].

Suolan ollessa liukenevaa se ei suojaa sementin rakennetta [46]. Suolan ollessa huonosti liukenevaa tai liukenematonta, suola ei automaattisesti ole vaaratonta tai tarjoa suojaa vaikutusta betonille [46]. Tärkeää on suolan moolitilavuus verrattuna CH:n ja C-S-H-geelin moolitilavuuksiin [46]. Suolat pyrkivät betonin mikrorakenteen rakoihin ja koloihin, joissa suuremman moolitilavuuden omaavat suolat paisuttavat betonia, kun taas matalan moolitilavuuden suolat eivät aiheuta merkittäviä vaurioita [46]. Tutkimuksista voi kuitenkin vetää sen johtopäätöksen, että orgaanisten happojen vahingollisuus betonille on happokohtaista ja on vaikeaa määrittää yleispäteviä linjauksia.

Orgaaniset hapot rasittavat betonia useimmiten veteen liuenneena, käytännössä jätevesissä [12, s. 329]. Ohutseinäiset betonirakenteet, kuten betoniputket, ja rakenteet joita vesi rasittaa toiselta puolelta ja ilma toiselta, ovat kaikista kriittisimpiä happaman veden vaikutuksille [12, s. 332]. Happaman veden kemikaalirasituksia käsitellään veden kemiallisten rasi-  
tusten yhteydessä luvussa 3.8.

Orgaanisia happoja kestävätkä betonit vaativat usein suunnittelijaltaan ymmärrystä mitkä mekanismit vaikuttavat tietyn hapon ja sementin väliseen reaktioon. Orgaaniset hapot ovat yleensä heikkoja happoja ( $\text{pH} \approx 4 - 7$ ), jotka erottuvat vedessä ja reagoivat sementtipastan hydratoituneiden ja vedettömien osien kanssa. Pääasiallisena reaktiotuotteena tästä reaktiosta saadaan kalsiumsuoloja tai -yhdisteitä. Orgaanisten happojen vauriomekanismit ovat yhteydessä hapon ja vastaavien kalsiumsuolojen ja -yhdisteiden ominaisuuksiin. Hapon happovakio ( $K_a$ ) ja suolan liukoisuus vaikuttavat suoraan hapon aggressiivisuuteen. [46]

Kenties merkittävin yksittäinen orgaanisten happojen rasi-  
tuskohde ovat elintarviketeollisuuden betonirakenteet, joihin kohdistuu tehtaiden jätevesien rasi-  
tusta. Nämä jätevedet sisältävät merkittäviä määriä orgaanisia happoja, jotka rasittavat betonirakenteita. Elin-  
tarviketeollisuuden orgaaniset hapot ovat peräisin kasveista ja hedelmistä, tai ne voivat tulla jätevesien mikro-organismeista. [46]

Orgaaniset hapot ovat osana monissa teollisuuden prosesseissa, joko prosesseihin osallistuvissa materiaaleissa, prosessissa muodostuvina (sivu)tuotteina tai jäteveden seassa. Näillä tuotteilla voi olla haitallisia vaikutuksia betonirakenteisiin, kuten myös kääntäen betonipinnoilla (esimerkiksi säiliöissä) voi olla haitallisia vaikutuksia prosessista saadun tuotteen ominaisuuksiin. Teollisuuden prosesseihin osallistuvat orgaaniset hapot voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: veteen liukenevat hapot (kuten maito-, voi- ja etikkahappo) sekä veteen liukenemattomat hapot (kuten öljy- ja steariinihappo). [12, s. 335]

Vesiliukoisista hapoista maito- ja voi-  
hapot ovat kaikista haitallisimpia sementtikivelle. Niiden pH-arvo voi olla 4 luokkaa elintarviketeollisuuden jätevesissä. Niiden yhteydessä ei käytetä pinnoittamattomia betonisäiliöitä muiden vaatimusten johdosta, mutta esimerkiksi betonilattiat voivat olla ongelmallisia. Sementit eivät kestä niiden aiheuttamaa rasi-  
tusta eikä ohut pinnoitus tarjoa tarpeeksi kattavaa suojaa. [12, s. 335]

Säiliörehun tuotanto on tyypillinen maito-, voi- ja etikkahappoja muodostava tapahtuma, jossa happoja muodostuu happamaan nesteeseen liuenneena, joten niiden tuotantoon suunnitelluissa siiloissa voi syntyä aggressiivisia olosuhteita [12, s. 335-336] [50] [51]. Säiliörehu valmistetaan useimmiten maataloudessa fermentoimalla rehua korkeassa betonisiilossa, jossa ilma ei juuri pääse vaihtumaan (katso myös luku 4.6 biologisesta korroosiosta) [50] [51]. Tämä hapon neste pääsee valumaan siilon (tai muun rakenteen) alaosiin, joissa se rasittaa betonirakenteita [51]. Siilojen lisäksi teollisuuslaitoksissa käsitellään säiliörehua ja niissä pitää huomioida mihin tämä säiliörehun niin sanottu jätevesi kulkeutuu [50] [51].

Säiliörehua fermentoivissa siiloissa ja käsittelevissä tehtaissa jauhetun granuloidun masuunikuonan [50] [51], silikan [51] tai teräskuitubetonin [51] käyttö pidentää betonirakenteiden käyttöikää huomattavasti tavallisesta portlandsementistä valmistettuun betoniin verrattuna. Pelkästään masuunikuonan käyttö parantaa säiliörehun fermentoinnissa syntyneelle happamalle maito- ja etikkahappoa sisältävälle nesteelle altistetun betonirakenteen kestävyyttä lukuisilla tavoilla [50]. Tutkimuksessa [50] on todettu ulkonäön, tiiviysominaisuuksien, läpäisevyyden, imeytymisominaisuuksien, massan muutosten, puristuslujuuden sekä suolojen kiteytymisominaisuuksien olevan parempia verrattuna portlandsementtiin.

Tehtaissa joissa käsitellään biomateriaalia, kuten esimerkiksi biokaasutehtaissa, betonirakenteet joutuvat erittäin voimakkaiden, prosessin sivutuotteina, syntyvien happojen rasittamiksi [51]. Biologisesta materiaalista voi muodostua käsittelyn aikana mikrobiologisen toiminnan seurauksena erittäin happamia yhdisteitä ( $\text{pH} < 4,0$ ), joka voi jäädä betonirakenteen päälle liuoksena suljetussa tilassa. Lisäksi esimerkiksi biomateriaalin fermentointiprosessissa voi muodostua epäorgaanista rikkihappoa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) vastaavasti kuin betonisten viemärien tapauksessa [51], jonka muodostumista käsitellään luvussa 4.6. Muodostunut rikkihappo aiheuttaa betonirakenteille erittäin happaman ympäristön ( $\text{pH} < 1,0$ ) joka progressiivisesti tuhoaa betonirakennetta [51]. Suositeltavaa on pyrkiä vähentämään nestemäisen happaman aineen määrää betonipinnoilla prosessitiloissa [51].

Etikkahappo on etikan tärkein osa-aines ja etikasta sitä on noin 3 – 5 prosenttia. 5 prosenttisen liuoksen pH-arvo on 3,5 luokkaa ja kohdistaa voimakkaan hyökkäyksen portlandsementistä valmistettuun betoniin. Matalilla pitoisuuksilla olevan etikkahapon torjumiseen riittää pozzolaanista sideainetta tai masuunikuonaa sisältävän betonin käyttö, mutta voimakasta rasitusta odotettaessa betoni on syytä pinnoittaa. Etikkahapon hyökkäystä vahvistavat tehtaissa käytetyt hedelmien sisältämät hapot, sokerit sekä prosessien korkea lämpötila. [12, s. 336]

Betonit voivat altistua sokereille tehtaissa, joissa käsitellään hedelmiä. Tarkalleen nämä sokerit ovat glukoosi (rypälesokeri) ja fruktoosi (hedelmäsokeri), jotka ovat peräisin makeiden hedelmien hedelmämehusta, hunajasta ja sakkaroosista. Näiden lisäksi teollisuudessa käsiteltäviä yleisiä sokereita ovat maltoosi (mallassokeri), laktoosi (maitosokeri) ja ksyloosi (puusokeri). Sokerit reagoivat kovettuneen portlandsementin CH:n kanssa, muodostaen kalsiumsakkaraattia. Rasituksen jatkuessa tai ollessa tarpeeksi voimakasta, reaktio kuluttaa CH:n loppuun ja tuhoaa kovettuneen sementin rakenteen, joka johtaa betonin pehmentymiseen ja lujuudenmenetykseen. Tämä on erityisen haitallista betonilattioilla, joissa on myös mekaanista rasitusta kuluttamassa lattianpintaa. Mikäli sokereita sekoitetaan osaksi sementtipastaa, ne toimivat erittäin voimakkaina hidastimina, mutta niiden käytössä on oltava tarkkana. Ne hidastavat normaaleja sementtipastan kemiallisia reaktioita ja kiteytymistä. 0,05 prosenttia sokeria sementin kokonaispainosta voi estää lujuudenkehityksen ensimmäisen vuorokauden aikana ja suuremmat määrät voivat kokonaan estää betonin kovettumisen. [12, s. 336-337]

Hedelmiä ja marjoja käsittelevissä tuotantolaitoksissa betonirakenteet voivat altistua monille erilaisille orgaanisille hapoille, joiden pH-arvot vaihtelevat noin 2,6 – 3,6 välillä. Hapot voivat esiintyä vapaina happoina tai suoloina. Happojen matalan pH:n vaikutuksesta hapot ovat aggressiivisia betonille. Nämä hapot ovat haitallisia betonille jo heikkoina liuoksina ja rapauttavat portlandsementistä valmistettuja betoneita huomattavasti jo vuoden jatkuneen rasituksen jälkeen. [12, s. 336]

Veteen liukenemattomia orgaanisia happoja ovat myös eläin- ja kasvisrasvat sekä eläin- ja kasvisöljyt kuten glyseridi tai esteri [12, s. 337]. Nämä on eroteltu omaksi luvukseen 3.4.

### 3.3.2 Epäorgaaniset hapot

Epäorgaaniset hapot (tai mineraalihapot) ovat jalostettuja tuotteita, joita ei esiinny luonnollisesti rikkihappoa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) lukuun ottamatta. Rikkihappoa voi muodostua hapettavissa ja kosteissa olosuhteissa tietyistä sulfidimineraaleista [12, s. 325]. Epäorgaaniset hapot esiintyvät usein veteen liuenneina kaasuihin, mutta teollisuuden rakenteissa myös potentiaalisesti happoliuoksena [12, s. 324]. Betonirakenteet, joiden yhteydessä valmistetaan, säilötään tai käytetään epäorgaanisia happoja, tarvitsee suojata happohyökkäystä vastaan [12, s. 324]. Yleisiä vahvoja epäorgaanisia happoja ovat esimerkiksi suolahappo, typpihappo sekä rikkihappo [3, s. 55]. Suolahapon vaikutuksesta muodostuu kalsiumkloridia  $\text{CaCl}_2$ , joka liukenee hyvin veteen [3, s. 55]. Typpihappo tuottaa kalsiumnitraattia  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , joka on hyvin liukenevaa [3, s. 55]. Rikkihapon vaikutuksesta muodostuu kalsiumsulfaattia  $\text{CaSO}_4$ , joka saostuu kipsiksi [3, s. 55].

Epäorgaanisten happojen aiheuttamassa rasituksessa on tyypillistä, että rasituksen aiheuttamat muutokset betonin mikrorakenteessa tunkeutuvat betonin sisään. Visuaalisesti pinnassa havaittavan vaurioituneen alueen lisäksi epäorgaaniset alueet vaurioittavat betonia sisäisesti kahdella erilaisella alueella, jotka tunkeutuvat ehjään betonirakenteeseen rasituksen jatkuessa. Betonin pinnassa on optisesti havaittava vaurioitunut alue, jolla on korkea huokoisuus ja matalat mekaaniset lujuusominaisuudet. Siirtymäalue sijaitsee vaurioituneen kerroksen ja ehjän betonin välissä, jossa portlandiitti liukenee ja kalsium poistuu C-S-H:n rakenteesta, kuitenkin pitäen C-S-H:n rakenteen yhtenäisenä. [47]

Rikkihappo on yleisesti ottaen eräs vaarallisimmista hapoista betonille. Tämä johtuu siitä, että sen reagoidessa betonin kanssa, ioninvaihtoreaktioissa muodostuu sulfaatteja, jotka aiheuttavat tavallisen betonin liukenemisen lisäksi betonin paisumista [8, s. 133]. Vahvat epäorgaaniset hapot liuottavat kaikkia sementtikiven komponentteja, kun taas hieman heikommät epäorgaaniset hapot liuottavat kalsiumhydroksidia [8, s. 132].

Eräs tyypillisimmistä epäorgaanisten happojen aiheuttamista rasituksista on betonisten viemäreiden (ja tuulettamattomien säiliöiden) vaurioituminen rikkihapon muodostumisen johdosta tuulettamattomassa jätevesisäiliössä tai viemäriässä [5, s. 27] [12, s. 327]. Ilmiötä kutsutaan betonin biologiseksi korroosioksi ja sitä käsitellään luvussa 4.6.

### 3.4 Kasvisöljyt ja -rasvat sekä eläinöljyt ja -rasvat

Kasvisöljyt ja -rasvat sekä eläinöljyt ja -rasvat ovat veteen liukenemattomia orgaanisia happoja [12, s. 337]. Kasvisperäisiä öljyjä ovat esimerkiksi glyseridi ja esterit [12, s. 337]. Kasvisperäiset öljyt sisältävät usein vapaita happoja, mutta tuoreet eläinrasvat sisältävät pienempiä määriä [12, s. 337]. Glyseridit hajoavat veden kanssa kontaktiin tullessaan hydrolyysissa alkuperäiseksi hapoksi ja alkoholiksi [12, s. 337]. Happojen hydrolyysissä happo toimii katalyyttinä reaktiossa ja alkalipohjaisessa hydrolyysissa hydroksidin metalli muodostaa suolaa rasvaisten happojen kanssa [12, s. 337]. Tämä on periaatteellinen saippuoiden syntymätapa [12, s. 337]. Kasvisöljyjen vauriomekanismina toimii useimmiten ioninvaihto [5, s. 92].

Rasvojen ja veteen liukenemattomien happojen koskettaessa portlandsementistä valmistetun betonin pintaa, ne hydrolysoituvat kalsium-, natrium- ja kaliumhydroksidien vaikutuksesta, muodostaen saippuota ja vapauttaen glyserolia, joka voi itsessään reagoida edelleen sementin kanssa. Alkalimetallien (tässä Na, K) saippuat ovat vesiliukoisia, kun taas kalsiumin saippuat eivät ole liukene. Öljyissä ja rasvoissa olevat vapaat hapot hyökkäävät betoniin suoraan. Glyseroli hyökkää betoniin hitaasti yhdistämällä ja liuottamalla kalsiumhydroksidia sementistä, muodostaen kalsiumglykolaattia. Hartsipinnoitteita voidaan käyttää glyserolirasitusta vastaan. [12, s. 337]

Orgaanisten öljyjen betonia rasittava vaikutus riippuu kuinka hyvin öljy pääsee tunkeutumaan betoniin. Öljyt jotka ovat kosketuksissa ilman kosteuden kanssa ja ovat hapettuneet, ovat tuoreempia öljyjä aktiivisempia. Suljetuissa betonitankeissa olevat öljyt rapauttavat betonilattian ja sitä suojaavat kalvot nopeasti. Betonilattioiden kanssa onkin usein ongelmaa teollisuuslaitoksissa, joissa valmistetaan saippuaa, margariinia ja muita ruokia. Korkea mekaaninen rasitus lisää rapautumisnopeutta. Kasvisöljyt jotka eivät sisällä glyseridejä eivät reagoi kemiallisesti betonin kanssa. [12, s. 337-338]

### 3.5 Emäkset

Betoni on emäksinen aine, joten vain erittäin vahvat emäkset syövyttävät sitä [13], eivätkä nekään ole erityisen vaarallisia yleisellä tasolla [5, s. 90-93]. Betonin emäksisyyden aiheuttaa pääasiassa betonin sisältämä kalsiumhydroksidi. Koska betoni on itsessään emäksistä, kemiallisista reaktioista emästen kanssa syntyy usein vastaavia tuotteita, jotka eivät muuta betonin rakennetta merkittävästi.

Teollisuudessa käytettäviä voimakkaita emäksiä ovat esimerkiksi erilaiset hydroksidit, tunnetuimpana eräs voimakkaimmista emäksistä natriumhydroksidi (NaOH) eli lipeä. Lipeä on vain lievästi aggressiivinen betonille [5, s. 91] ja on epätodennäköistä että se aiheuttaa merkittäviä tuhoja ilman betonin pitkään kestävää altistumista vahvalle lipeäliuokselle, mikä on epätodennäköistä terveys- ja ympäristövaikutusten vuoksi.

### 3.6 Kloridit

Kloridit ( $\text{Cl}^-$ -ionit) ovat eri aineiden suoloja (eli kemiallisten aineiden yhdisteitä kiteisessä muodossa [10]). Kloridien tunkeutuminen betoniin on merkittävä syy betoniterästen ruostumiselle. Kloridit voivat olla peräisin betonimassan valmistuksesta tai ne voivat kulkeutua ympäristön eli meriveden, jäänpoistoaineiden ja teollisuuden prosessien vaikutuksesta valmiiseen betonirakenteeseen [3, s. 56] [20]. Betonimassan valmistuksen yhteydessä klorideja voi olla kiihdyttimissä ja kiviaineksessa [3, s. 56]. Kloridit eivät suoraan tuhoa betonia, mutta ne rikkovat raudoitusta suojaavan passiivikalvon kun kloridikonsentraatio raudoitusten pinnalla on tarpeeksi suuri [3, s. 56]. Betonin käyttökäsuunnittelussa kloridien aiheuttama rasitus huomioidaan rasitusluokissa XD ja XS [5, s. 18]. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6.

Kloridien tunkeutuminen betoniin on vettä hitaampaa ja se tapahtuu vähitellen betonin vesitäytteisiin huokosiin diffuusion vaikutuksesta [8, s. 114]. Vain vapaat eli huokosvedessä olevat vesiliukoiset kloridit pystyvät liikkumaan betonissa [8, s. 116]. Kloridipitoisuus pienenee tasaisesti mentäessä syvemmälle betoniin [8, s. 114]. Kloridien tunkeuduttua betoniin betoniterästen tasolle, ne rikkovat betoniteräksiä suojaavan passiivikalvon [20]. Kloridit alkavat rikkoa passiivikalvoa kriittisen kloridipitoisuuden ylittyttyä betonissa, mikä on noin 0,03 – 0,07 % betonin painosta [8, s. 115]. Kriittinen kloridipitoisuus riippuu betonin sideaineesta sekä kyvystä sitoa klorideja, sillä vain huokosvedessä olevat kloridit voivat aiheuttaa raudoituksen korroosiota [8, s. 115]. Portlandsementillä on korkea pH, jonka vuoksi sen kriittinen kloridipitoisuus on suurempi kuin esimerkiksi masuunikuonasementillä [8, s. 115]. Sementtimäärän ja kalsiumaluminaatipitoisuuden ( $\text{C}_3\text{A}$ ) kasvattaminen sementissä parantavat betonin kemiallista kloridikestävyyttä [8, s. 115]. Tärkein ominaisuus on betonirakenteen tiiviys, joka voidaan saavuttaa alhaisella vesi-sementtisuhteella ja esimerkiksi silikajauheen käytöllä [8, s. 115].

Kloridit sitoutuvat  $\text{C}_3\text{A}$ :n (ja  $\text{C}_4\text{AF}$ :n) hydrataatiotuotteiden kanssa, muodostaen Friedelin suolaksi (engl. Friedel's salt,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) kutsuttua ainetta, joka ei ole itsessään betonille haitallista. Kloridin sitoutuminen toimii tärkeänä mekanismina betoniteräksen korroosioon liittyen, koska se poistaa kloridi-ioneja huokosvedestä, jolloin betoniterästen passiivikalvoa rasittavien kloridien määrä pienenee. Valun aikaiset kloridit sitoutuvat  $\text{C}_3\text{A}$ :n vaikutuksesta, mutta ulkopuolisesta lähteestä betoniin tunkeutuvat kloridit eivät sitoudu  $\text{C}_3\text{A}$ :n vaikutuksesta vastaavalla tavalla. Sitoutuneita klorideja vapautuu betonin karbonatisoiduttua, sillä hydrataatiotuotteet muuttavat ominaisuuksiaan. Tällöin kloridien aiheuttama korroosio kiihtyy betonissa. [20]

Voimakkainta kloridikorroosio on jatkuvan kastumisen ja kuivumisen rasittamassa betonissa [3, s. 69] tai kloridipitoisen veden kulkeutuessa betonin läpi, kun toisella puolella on ilmaa ja toisella vettä [8, s. 84]. Kloridipitoisen veden kloridit pääsevät rikastumaan betonin pintakerrokseen ja kastumisen alussa kloridipitoinen vesi imeytyy kapillaarisesti betonin syvempiin kerroksiin [3, s. 69], läpikulkeutuvalla vedellä kloridit rikastuvat matkan varrella [8, s. 84]. Kuivumisen aikana vesi poistuu, mutta kloridit jäävät betoniin [3, s. 69]. Tätä ilmiötä estetään parhaiten minimoimalla imeytymissyvyys

eli käytännössä vähentää betonin huokoisuutta ja halkeiluastetta [3, s. 69]. Ilmiön jatkuessa kloridit väkevöityvät niiden rikastuessa samoihin paikkoihin [3, s. 69], josta voi aiheutua merkittävää rasitusta.

Kloridien aiheuttaman betoniterästen korroosion estämisessä betonirakenteen tiiviys ja betonin halkeilun estäminen ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia [8, s. 115]. Halkeama-levyysien ollessa suurempia kuin 0,1 – 0,15 mm, kloridien aiheuttaman korroosion alkamisriski on huomattavasti kohonnut [3, s. 70]. Nostamalla  $C_3A$ :n osuutta sementissä, kloridien sitoutuminen sementissä nousee, mikä vähentää kloridien kulkeutumista syvälle betoniin ja näin ollen raudoituksen korroosiota [20]. Vapaana olevat kloridit tällöin stabiloituvat Friedelin suolaksi, mikä puolestaan vaikuttaa muiden kloridien kulkeutumiseen betonissa [20].  $C_3A$ :ta paljon sisältävissä betoneissa kloridien määrä betonin pinnan lähellä nousee niiden sitoutuessa [20]. Tästä vaikutuksena kloridien sisääntulo betoniin helpottuu pinta-alueilla joissa on paljon sitoutunutta kloridia, mutta kloridien tunkeutuminen syvälle betonin sisälle vaikeutuu [20].  $C_3A$ :n lisääminen betonissa pienentää jähmettymisaikaa, kasvattaa betonin lujuutta ja vähentää huokosten tilavuutta betonissa [20]. Betonin vesi-sementtisuhde on tärkeässä roolissa, sillä matalalla vesi-sementtisuhteella saadaan betonia, joka on tiivistä ja jossa on vähän kapillaarihuokosia, joita pitkin kloridien välittymien pääsee tapahtumaan [8, s. 115]. Huokosrakenteen muutosten vaikutuksena kloridien diffuusion tunkeutumisreitit syvälle betoniin vähenevät ja saattavat lyhentyä huomattavasti [20]. Betonin sideainekoostumuksella voidaan vaikuttaa huokosveden emäksisyyteen eli hydroksyyli-ionien määrään ja sen kautta myös kriittisen klooripitoisuuden arvoon [8, s. 116].

Vapaan kloridin tunkeutuminen betoniin nousee hieman sulfaattien läsnä ollessa normaalissa portlandsementistä valmistetussa betonissa [52]. Sulfaatin läsnäolo kloridiliuoksessa vähentää betonin rapautumista sekä kastumis-kuivumissyklin alaisena [53] että ilman sitä [52].

Jaksoittainen yhdistetty kloridi- ja sulfaattirasitus on vähemmän betonia rasittavaa kuin yksittäisen suolan aiheuttama rasitus, kun rasitus tapahtuu kastumis- ja kuivumissykleissä [53]. Yhdistetyssä kloridi- ja sulfaattirasituksessa sulfaatinkestävä sementti vähentää myös kloridin tunkeutumaa betoniin, mikäli rasitus koostuu kastumis- ja kuivumissykleistä [52], eikä esimerkiksi jatkuvasta meriveden rasituksesta. Kloridien ja sulfaattien ollessa samanaikaisesti kastumis- ja kuivumissykliin syövyttävässä ympäristössä, sulfaatti rajoittaa kloridien diffuusiota betoniin [53]. Sulfaattia sisältävissä kloridiliuoksissa Friedelin suolan muodostuminen on hitaampaa ja vastaavasti klorideja sisältävissä sulfaattiliuoksissa kloridit hidastavat ettringiitin muodostumista [53]. Lentotuhkan tai granuloidun jauhetun masuunikuonan lisääminen betoniin vähentää kloridien tunkeutumaa yhdistetyssä kloridi- ja sulfaattirasituksessa [53].

Sulfaatinkestävää sementtiä ei suositella käytettäväksi jatkuvasti merivedelle alttiissa betonirakenteissa huomattavasti kohonneen betoniterästen korroosioriskin vuoksi [20] [52]. Tämä johtuu sulfaattien aiheuttamasta, ajan myötä nousevasta diffuusion kasvusta

[52]. Lisäksi sulfaatinkestävissä sementeissä  $C_3A$ :n osuutta on rajoitettu, jolloin kloridit voivat tunkeutua betoniin helpommin.

Jäänsulatusaineissa olevat kloridit tunkeutuvat helpommin betoniin, mikäli betonissa on jäätyamisen aiheuttamia vaurioita. Suojahuokosia tai tarpeeksi ilmaa sisältävässä betonissa jäätymis-sulatusrasitus ei muodostu ongelmaksi. Erityisesti matalan vesi-sementtisuhteen betoneilla, joilla on riittävästi suojahuukoja, jäätyminen ei lisää kloridien tunkeutumista betoniin. [54]

Betonin sisältämä suurin sallittu kloridimäärä on rajoitettu sementin koostumuksen kautta betonistandardissa SFS-EN 206. Standardia tulee soveltaa standardin SFS 7022 mukaisesti, jossa määritellään Suomen oloihin suurimmat sallitut kloridipitoisuudet taulukon 12 mukaisesti. Standardin [25] mukaisesti kalsiumkloridia tai muita kloridipitoisia seosaineita ei saa käyttää betoniin, johon tulee betoniteräksiä tai muita metalliosia.

**Taulukko 12.** Betonin suurin sallittu kloridipitoisuus. [55]

Betonin käyttö	Kloridipitoisuus-luokka	Suurin sallittu Cl-pitoisuus sementin massasta <sup>1)</sup> [%]
Ei sisällä raudoitusteräksiä eikä muita metalliosia paitsi korroosionkestäviä nostolaitteita	Cl 1,00	1,00
Sisältää raudoitusta tai muita metalliosia	Cl 0,20	0,20
Sisältää jänneraudoitusta	Cl 0,20	0,20

1) Kun käytetään tyyppin II seosaineita, jotka otetaan huomioon sementtimäärää määritettäessä, kloridipitoisuus ilmoitetaan kloridin määränä massaprosentteina sementin ja niiden seosaineiden yhteismäärästä, jotka otetaan huomioon vesi-sementtisuhteen laskemisessa.

### 3.7 Sulfaatit

Sulfaatit ovat erilaisten aineiden suoloja. Sulfaateiksi kutsutaan erilaisten yhdisteiden sulfaatti-ioneja ( $SO_4^{2-}$ ). Sulfaattihyökkäys on kemiallinen reaktio sulfaatti-ionien ja portlandsementin tai portlandsementtiklinkkeriä sisältävän sementin trikalsiumalumiinaatin ( $C_3A$ ) tai sen reaktiotuotteiden kanssa [3, s. 55] [8, s. 133]. Sulfaatit eivät suoraan liuota betonin sideainetta, vaan ne muodostavat yhdisteitä, joiden tilavuus on suurempi kuin alkuperäisten reaktiotuotteiden, joka johtaa betonin paisumiseen [8, s. 133]. Hallitsematon sulfaattirasitus johtaa lopulta betonin täydelliseen rapautumiseen [3, s. 55]. Betonin sulfaattirasitukselle on määritelty raja-arvoja betonin käyttöikäsuunnittelussa XA-rasitusluokissa. Nämä kuitenkin koskevat vain luonnollisista lähteistä aiheutuvia maaperän ja pohjaveden kemiallisia rasituksia. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6.



Sulfaatit tunkeutuvat betoniin reagoiden portlandiitin kanssa, muodostaen kipsiä (kalsiumsulfaattihydraattia) [56]. Sulfaatti-ionit jatkavat reagointia muodostuneen kipsin ja kalsiumaluminaattihydraattien, monosulfaatin tai hydratoitumattoman  $C_3A$ :n kanssa muodostaen ettringiittiä [3, s. 55] [57]. Ettringiitin tilavuus on noin nelinkertainen verrattuna reaktion lähtöaineisiin, mikä puolestaan aiheuttaa betonin vaurioitumisen ja lujuuden menetyksen paisuttamalla sitä [56], kuten luvussa 3.2 on käsitelty. Sulfaatin aiheuttaman paisumisen suuruusluokka riippuu siitä, minkä aineen kanssa sulfaatti reagoi ja betonin kovettumisasteesta; mitä kovettuneempaa betoni on, sitä vahingoittavampaa sulfaattien muodostamien reaktiotuotteiden aiheuttama paisuminen on [12, s. 310].

Sulfaatteja esiintyy sekä luonnon maaperässä ja vesissä että teollisuudessa käytettävissä kemikaaleissa [12, s. 308]. Luonnossa sulfaatteja esiintyy maissa vanhan merenpohjan eli Suomessa muinaisen Litorina-meren alueilla (Suomen länsirannikolla) [5, s. 24-25] sekä kiisupitoisten maiden alueella [8, s. 133]. Huomattavaa luonnollisesta sulfaatti-hyökkäyksestä on merivesi, jonka kloridit ehkäisevät sen sisältämien sulfaattien betonia vaurioittavaa vaikutusta [52]. Luonnossa yleisesti esiintyviä sulfaatteja ovat kalsium-, magnesium-, natrium- ja kaliumsulfaatit [12, s. 308].

Kaikilla veteen liukenevilla sulfaateilla on betonia vaurioittava vaikutus, mutta vauriomekanismi ja vaurion suuruus riippuvat sulfaattityypistä ja voimakkuudesta [12, s. 308]. Esimerkiksi kalsiumsulfaatti reagoi betonin kalsiumyhdisteiden kanssa muodostaen kalsiumsulfoaluminaattia [12, s. 308]. Natriumsulfaatti puolestaan reagoi ensin vapaan kalsiumhydroksidin (CH) kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia, joka sen jälkeen reagoi aluminaattiyhdisteiden ( $C_3A$  ja sen reaktiotuotteet) kanssa [12, s. 308]. Kalsiumsulfaatin ja  $C_3A$ :n reaktiossa tunnetusti muodostuu luvun 2.1.3 mukaisesti ettringiittiä, joka johtaa lopulta betonin paisumiseen ja vaurioitumiseen.

Magnesiumsulfaatti on betonille vaarallisin sulfaatti. Magnesiumsulfaatti hajottaa C-S-H-geelin rakenteen, muodostaen kipsiä, jolla ei ole lujuusominaisuuksia. Magnesiumsulfaatti myös reagoi kemiallisesti  $C_3A$ :n ja CH:n kanssa, muodostaen ettringiittiä. Syyinä magnesiumsulfaatin aggressiivisuuteen on liuoksen matala liukoisuus sekä kyllästyneen liuoksen matala pH-arvo (noin 10,5), joka on liian matala C-S-H:n stabiilina pysymiseen. Reaktiosta muodostuu lopulta hydratoitunutta magnesiumsilikaattia, jolla ei ole C-S-H-geelin kaltaisia sitoutumisominaisuuksia. Magnesiumsulfaattihyökkäyksen alainen betoni pehmenee ja menettää lujuusominaisuutensa. [12, s. 309-310]

Sulfaattien aiheuttaman betonin vaurioitumisen edellytyksenä on betonin riittävä kosteuspitoisuus [8, s. 133]. Vaurioitumiseen vaikuttavat betoniin kohdistuvan sulfaattirasituksen suuruusluokka, määrä sekä kosteuden pääsy betoniin [8, s. 133]. Sulfaattirasitus on suurimmillaan betonirakenteen ajoittain kastuessa ja välillä kuivuessa [58]. Sulfaattihyökkäyksen voimakkuuteen vaikuttavat suolatyyppin lisäksi betonin  $C_3A$ -pitoisuus sekä sulfaattiliuoksen pitoisuus [12, s. 311].

Trikalsiumaluminaatti  $C_3A$  on pääasiallinen sementtipastan osa-aines, johon sulfaattien rasitukset kohdistuvat, joten sulfaatinkestävyys usein paranee pienentämällä sen osuutta sementissä [6] [8, s. 133] [12, s. 313].  $C_3A$ :n ja sementtityypin lisäksi betonin tiiviydellä

ja betonin sisältämällä vedellä on merkitys sulfaatinkestävyyteen [3, s. 55] [8, s. 133]. Sulfaatin aiheuttama vaurioituminen nopeutuu vedessä matalan pH:n ja happaman veden aiheuttaman liukenemisen seurauksena [21].

Betonia voidaan suojata sulfaattihyökkäyksiltä käyttämällä sulfaatinkestävää sementtiä tai masuunikuonasementtiä. Sulfaatinkestävien sementtien toiminta perustuu matalaan  $C_3A$ :n osuuteen sementissä, tai jauhetun granuloidun masuunikuonan käyttämiseen vähintään 70 % betonin sideaineesta. Standardin SFS-EN 197-1 mukaiset sulfaatinkestävät sementtityypit on esitelty tarkemmin luvussa 2.1.4. Tämän lisäksi betonia voidaan suojata sulfaattirasitukselta pienentämällä betonin vedenläpäisevyyttä eli parantamalla tiiviyyttä [3, s. 55]. Betonin pinnan tiiviydellä on merkittävä vaikutus sulfaatin tunkeutumiskykyyn [12, s. 317-318].

Merennrannassa olevat betonirakenteet ovat erittäin aggressiivisissa rasitusolosuhteissa jatkuvan suolaveden kastumis- ja kuivumissyklin rasittamina. Merivesi sisältää sekä klorideja ja sulfaatteja ja sen rasitus voi esiintyä myös virtauksina, vuorovesinä ja roiskeina [53]. Tutkimuksilla on osoitettu yhdistetyn kloridi- ja sulfaattirasituksen olevan vähemmän haitallista betonille kuin pelkän sulfaattirasituksen kastumis-kuivumissykleissä [52] [53]. Tämä perustuu siihen, että sekä kloridit ja sulfaatit pyrkivät sitoutumaan sementin  $C_3A$ :n kanssa, muodostaen Friedelin suolaa ja ettringiittiä, mutta vain pienen määrän sulfaatin toista reaktiotuotetta eli kipsiä [52]. Syyksi tähän on todettu se, että sulfaatti vahingoittaa betonia vain kun sekä ettringiitti että kipsi pääsevät muodostumaan [52]. Huomattavaa kuitenkin on, että Friedelin suola ei ole stabiilia meriveden sisältämän natriumsulfaatin läheisyydessä, joten ajan myötä Friedelin suola katoaa betonista, jolloin lisää ettringiittiä ja kipsiä pääsee muodostumaan [52]. Sulfaattiliuoksessa olevat kloridit saattavat hidastaa sulfaattituotteiden, kuten ettringiitin, muodostumista [53]. Meriveden sulfaattipitoisuus yltää yleensä rasitusluokkaan XA1 [4, s. 20].

Klorideilla ei ole minkäänlaista vaikutusta sulfaattihyökkäyksen kohdistuessa sulfaatinkestävään masuunikuonasementtiin [52]. Masuunikuonasementillä on korkea vastuskykyä sulfaattihyökkäyksiä vastaan, eikä kloridien läsnäolo vaikuta tähän [52]. Pozzolaanisten materiaalien lisääminen betoniin parantaa betonin kestävyyttä yhdistettyä sulfaatti- ja kloridirasitusta vastaan kastumis-kuivumissykliä alaisena [53].

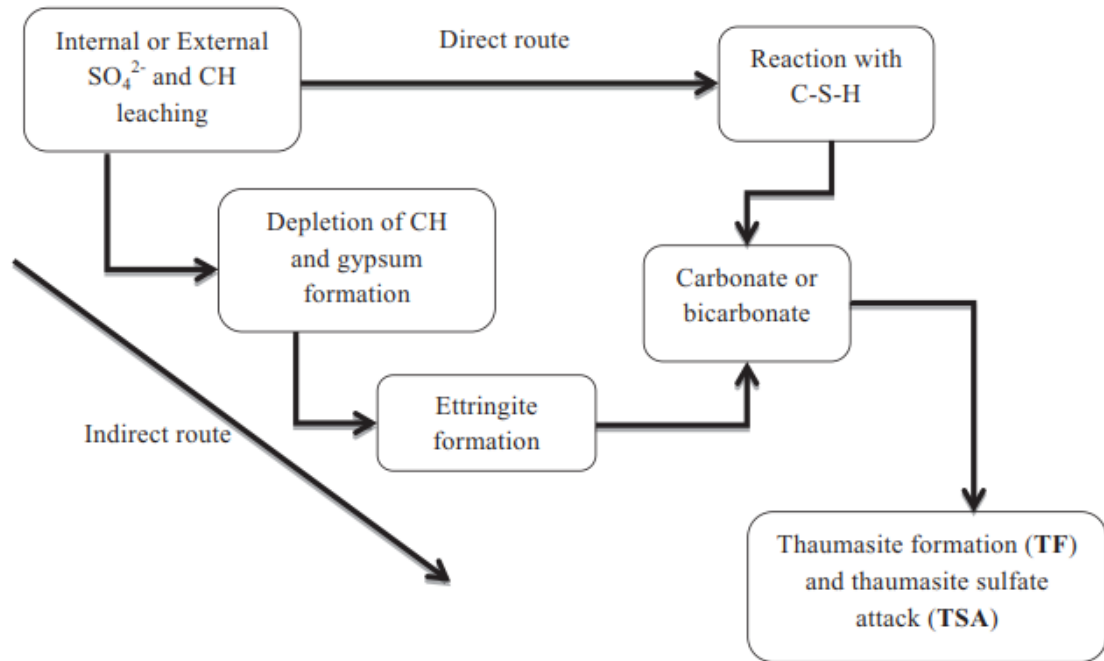
Mikäli betonirakenne on osittain maanalainen ja siihen kohdistuu sulfaattirasitusta maaperästä tai vedestä, ilman kanssa kosketuksissa oleva maanpinnan yläpuolinen osuus vaurioituu nopeammin kuin maanalainen osa [59]. Tämä johtuu veden kapillaarista nousua muistuttavasta ilmiöstä (engl. wick action), jossa vesi kulkeutuu maaperästä betonin yläosiin, kyllästäen betonin yläosan kokonaan [59]. Kun vesi haihtuu ilman kuivaavan vaikutuksen seurauksesta, betoniin jäävät vain veden mukanaan tuomat sulfaatit, jotka vaurioittavat betonia niiden kiteytyttyä ja laajennuttua [59]. Tämä ilmiö vahvistuu huomattavasti, mikäli betonirakenteeseen kohdistuu kemiallista sulfaattihyökkäystä [59], mikä teollisuuden kohteissa on potentiaalista.

### 3.7.1 Thaumasiitti

Sulfaattihiökkäyksen aikana betoniin voi muodostua ettringiitin lisäksi thaumasiittia ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ). Runsas thaumasiitin muodostuminen muuttaa sementin rakenteen yhtenäiseksi sosemaiseksi massaksi. Thaumasiitti vaatii muodostuakseen matalan lämpötilan betonissa ( $\leq 15^\circ\text{C}$ ), runsaasti kosteutta sekä kalsiumsilikaattia, sulfaatti-ioneja ja karbonaatti-ioneja. Pienet määrät thaumasiittia betonissa eivät ole haitallisia, mutta suurilla muodostumismäärillä se rasittaa sementin mikrorakennetta. [57]

Thaumasiitin aiheuttamasta sulfaattihiökkäyksestä betoniin käytetään lyhennettä TSA (engl. thaumasite sulfate attack) [57] [60]. TSA kohdistuu betonin C-S-H-geeliin, toisin kuin tavallinen sulfaattihiökkäys (magnesiumsulfaattia lukuun ottamatta), joka rasittaa betonin CH:ta ja  $\text{C}_3\text{A}$ :ta [61]. TSA:ta pidetään tavallista sulfaattihiökkäystä voimakkaampana, sillä se tuhoaa C-S-H-geelin rakenteen ja muuttaa sementin rakenteen pehmeäksi massaksi, kun taas normaalissa sulfaattihiökkäyksessä ettringiitin muodostuminen paisuttaa betonia [57]. TSA on usein merkittävin vaurioitumismekanismi syvälle maanpinnan alle rakennettujen perustusten heikkenemiseen ja tuhoutumiseen [60]. TSA:n aiheuttamia vahinkoja esiintyy suuressa osassa sulfaatin vakavasti vaurioittamia betonirakenteita [21].

Thaumasiitti pystyy muodostumaan betoniin joko suoraa reittiä tai epäsuoraa reittiä pitkin [57] [62]. Suorassa reitissä thaumasiitti muodostuu C-S-H-geelin ja kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) reagoidessa kosteuden ja vapaiden sulfaatti-ionien läsnä ollessa [57]. Epäsuorasti thaumasiittia muodostuu ettringiitin kautta [57]. Kosteuden mukana kulkeutuvien sulfaatti-ionien läsnä ollessa betonissa muodostuu ettringiittiä, joka edelleen reagoi C-S-H-geelin ja (bi)karbonaattien kanssa muodostaen thaumasiittia [57]. Thaumasiitin muodostumisen on todettu olevan todennäköisempää epäsuoran reitin kautta [57] [62]. Epäsuora reitti vaatii ettringiittiä tai  $\text{C}_3\text{A}$ :ta sementissä tapahtuakseen [62]. Thaumasiitin muodostumisreittejä havainnollistetaan kuvassa 10.



**Kuva 10.** Thaumasiitin muodostumistavat. [57]

Thaumasiitin esiintyminen ilman ettringiittiä betonissa on epätodennäköistä ja niiden on huomattu olevan osana betonin mikrorakennetta samanaikaisesti [57]. Thaumasiitin progressiivinen muodostuminen korreloi ettringiitin määrän vähentymisen kanssa [57]. Thaumasiittia muodostuu nopeammin matalissa lämpötiloissa ja se myös pysyy stabiilimpana betonirakenteen lämpötilan pysyessä matalana [63]. Thaumasiittia alkaa muodostua alumiini-ionien muodostettua ettringiittiä niin, että sulfaatti-ionien ja alumiinioksidien suhde muuttuu suuremmaksi kuin 3 ( $\text{SO}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 > 3$ ) [63]. Tätä alhaisemmilla suhteilla muodostuu vain ettringiittiä [63]. Sementin  $\text{C}_3\text{A}$  määrällä ei ole merkittävää vaikutusta thaumasiitin muodostumiseen, mutta sementin tulee sisältää sitä [63]. Thaumasitiin muodostumiseen vaikuttaa huokosveden  $\text{Ca} / \text{Si}$  -suhde [61].  $\text{Ca} / \text{Si}$  -suhteen ollessa 3 vain ettringiittiä muodostuu betoniin, suhteen ollessa 6 thaumasiittia muodostuu ja suhteen ollessa 9 thaumasiittia muodostuu jo muutamassa päivässä [61].

Thaumasiitti vaatii korkean pH:n (noin 12,5) muodostuakseen ja pysyäkseen stabiilina [57]. Kloridit betonissa pienentävät thaumasiitin muodostumisen todennäköisyyttä, koska se parantaa betonin emäksisten sulfaattien kestävyyttä ja pienentää betonin pH:ta [57]. Thaumasiitti vaikuttaa olevan suomalaisessa betonitekniikassa lähes tuntematon käsite, mikä viittaa siihen että ilmiötä ei ole juurikaan esiintynyt Suomessa – tai sitä ei ole tunnistettu oikein.

### 3.8 Veden kemikaalirasitukset

Veteen on luonnossa ja teollisuuden jäte- ja prosessivesissä liuenneena haitallisia kemikaaleja ja muita kemiallisia yhdisteitä. Happoja, klorideja ja sulfaatteja on käsitelty aiemmissa luvussa ja tässä luvussa käsitellään pääasiassa vettä sekä sen sisältämää hiili-

dioksidia ( $\text{CO}_2$ ). Veden aiheuttamat rasitukset huomioidaan betonin käyttöikäsuunnittelussa epäsuorasti karbonatisoitumisen aiheuttaman teräskorroosion rasitusluokissa XC [5, s. 13-17]. Nämä luokitukset käsittelevät betonirakenteita kosteissa olosuhteissa [5, s. 17]. Veden sisältäessä haitallisia kemiallisia yhdisteitä, kuten happoja tai sulfaatteja, rasitusta tarkastellaan rasitusluokissa XA [5, s. 26]. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6. Veden sisältämien betonille haitallisten aineiden ja ominaisuuksien arvoja on lisätty luvun 6.1 taulukossa 27.

Kuten luvun 3.3 yhteydessä on käsitelty, veden aiheuttama rasitus on erittäin voimakasta rakenteella, jonka toisella puolella vaikuttaa pitkäaikainen vedenpaine, milloin vesi pyrkii kulkeutumaan betonirakenteen lävitse toisella puolella olevaan ilmatilaan. Vesi imeytyy kapillaarisesti huokosverkoston avulla koko betonirakenteen sisään [8, s. 84]. Veden mukana imeytyy myös haitallisia aineita betoniin [8, s. 84], jolloin betonin sisäinen rakenne joutuu rasitetuksi. Jatkuvan kastumisen ja kuivumisen rasittamassa ympäristössä betonin pintakerrokseen rikastuu klorideja [3, s. 69]. Kastumisen alussa kloridipitoinen vesi imeytyy kapillaarisesti betoniin [3, s. 69]. Kuivumisen aikana imeytynyt vesi haihtuu pois, mutta sen tuomat kloridit jäävät betoniin [3, s. 69].

Vesi (erityisesti pehmeä vesi) itsessään liuottaa betonin kalsiumhydroksidia (CH) ja voi suodattaa kalkkia betonista, mikä heikentää veden virtaukselle altista betonia asteittain [12, s. 329] [37]. Tätä voi tapahtua betonin vesitiiviyyden ollessa heikkoa, joko koostumuksen tai halkeilun vaikutuksesta [37]. Kun CH:ta poistuu sementistä, silikaattiyhdisteet tuottavat lisää CH:ta C-S-H-geelin kustannuksella, säilyttäen huokosveden kylläystasasteen, mikä pitkään jatkuessa pienentää betonin lujuutta sekä vähentää betonin tiivyyttä [12, s. 329] [37].

Tärkeä ominaisuus vedessä on siihen liuenneista hapoista aiheutunut vapaan hiilidioksidin  $\text{CO}_2$ -pitoisuus, joka usein päättyy veteen orgaanisten tuotteiden hajoamisen kautta – ja vahvistaa veden aggressiivista vaikutusta betoniin. Veden vapaalla hiilidioksidilla tarkoitetaan hiilidioksidimäärää, joka ylittää sen mitä kalsiumbikarbonaatin muodostaminen vaatii. Reaktio muuttuu yhdestä reaktiosta kemiallisten reaktioiden sarjaksi. Vedessä  $\text{CO}_2$  liukenee hiilihapoksi ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), joka edelleen voi reagoida CH:n kanssa liukenemattomaksi kalsiumkarbonaatiksi ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalsiumkarbonaatti reagoi hiilihapon kanssa, muodostaen liukenevaa kalsiumbikarbonaattia ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ). Kalsiumbikarbonaatti madaltaa betonin pH:ta huokosveden kalsiumsuolojen tunkeuduttua betoniin. Reaktio voi mennä myös vastakkaiseen suuntaan, mutta tätä ei tapahdu mikäli liuoksessa on vapaata  $\text{CO}_2$ :a. Hieman vapaata  $\text{CO}_2$ :a tarvitaan myös stabilisoimaan kalsiumbikarbonaattia. Aggressiiviseksi  $\text{CO}_2$  kutsutaan sitä, joka pystyy liuottamaan lisää kalsiumkarbonaattia, josta edelleen muodostuu kalsiumbikarbonaattia. Vapaan  $\text{CO}_2$ :n vaadittava määrä kalsiumbikarbonaatin stabilisoimiseen nousee kalsiumsuolojen läsnä ollessa. [12, s. 329-331]

Merivesi rasittaa betonirakenteita veteen liuenneiden suolojen (pääasiassa kloridit ja sulfaatit) kemiallisten reaktioiden kautta, näiden suolojen kiteytymisenä betoniin kastumis-kuivumissykliä alaisena, jäätymisrasituksena, mekaanisena rasituksena aaltojen

ja virtauksien vaikutuksesta sekä betoniterästen korroosiona [12, s. 319]. Kloridien ja sulfaattien rasituksia sekä yhteisvaikutuksia on käsitelty luvuissa 3.6 ja 3.7 ja ne pitkälti pätevät meriveden rasituksiin.

Meriveden sisältämä  $\text{CO}_2$  aiheuttaa lievää betonin karbonatisoitumista. Normaalilla merivedellä tämä voi muodostaa ohuen suojaavan kalvon betonirakenteen pintaan, mutta mikäli meriveteen on liuennut normaalia enemmän  $\text{CO}_2$ :ta, betonille voi aiheutua vakavia vaurioita hiilihapon käyttäytyessä paljon voimakkaammin merivedessä. Erityistä vaaraa esiintyy katetuissa lahdissa ja soissa, missä merenpinnalla on orgaanista jätettä. Mikäli veden kalsium bikarbonaattipitoisuus ei ole huomattavasti koholla, aggressiivinen hiilidioksidi muodostaa betoniin hyökkäviä yhdisteitä. [12, s. 333]

Huomattavaa meriveden rasituksesta on betonin kalsiumyhdisteiden herkempi liukeneminen betonista, verrattuna makean veden rasittamaan betonirakenteeseen. Erityishuomiona magnesiumsulfaatin on todettu olevan meriveden kemiallisen rasituksen erityispiirre. Magnesiumsulfaatti reagoi C-S-H-geelin ja  $\text{CH}$ :n kanssa muodostaen lopulta magnesiumsilikaattigeeliä, jolla ei ole mainittavia lujuusominaisuuksia verrattuna C-S-H-geeliin. Meriveden magnesiumsulfaatin aiheuttamat rasitukset betonirakenteelle kulkevat karkeasti seuraavan mukaisesti: kalkki ja kalsiumsulfaatti liukenevat ja reagoivat magnesiumsulfaatin kanssa kalsiumsulfoaluminaatiksi, joka voi paisuttaa betonia ja jättää sen haavoittuvaiseksi tuleville rasituksille. Pozzolaanisten sementin sideaineiden on todettu auttavan tässä reaktiossa, jolloin niiden sisältämä kalkki reagoi magnesiumsulfaatin kanssa muodostaen lisää hydratoituneita silikaatteja. Kaikista rasitetuimmat olosuhteet ovat betonirakenteiden nousuveden tason yläpuolisilla betonirakenteen osilla. Korkealaatuisille ja oikealla sementillä tehdyille betonirakenteille meriveden aiheuttamat rasitukset eivät ole merkittäviä. [12, s. 319-320]

### 3.9 Maaöljyt

Maaöljytisleet kuten bensiinit ja moottoriöljyt eivät ole haitaksi kovettuneelle betonille [5, s. 91] [12, s. 338]. Maaöljyt eivät sisällä ainesosia, jotka reagoivat kemiallisesti sementin yhdisteiden kanssa [12, s. 338]. Ne ovat tosin vaarallisia tuoreelle betonimassalle, sillä ne häiritsevät veden sekoittumista ja estävät sementin hydrataation [12, s. 338]. Kreosootteja sisältävillä yhdistellä saattaa olla hieman reagointikykyä sementin yhdisteiden kanssa [12, s. 338].

Maaöljyt eivät reagoi betonin kanssa, mutta voi olla hankalaa estää niiden kulkeutumista betoniin ja lopulta sen läpi. Tämä riippuu öljyn ominaispainosta eli tietyn öljymäärän tilavuuden massan suhde vastaavan tilavuuden vesimäärän massa. Ominaispainon ollessa yli 0,875 betonista voidaan tehdä läpäisemätöntä, ominaispainon ollessa 0,850-0,875 pinnoitteilla voidaan saada aikaan läpäisemättömyys ja ominaispainon ollessa alle 0,850 tarvitaan erityisvalmisteisia materiaaleja estämään öljyn tunkeutuminen betoniin. [12, s. 338]

### 3.10 Kaasut

Tavallinen ilma koostuu pääasiassa neljästä kaasusta: typpi, happi, argon ja hiilidioksidi [12, s. 338-339]. Ilmakehässä on myös vesihöyryä sekä kaasuja, jotka syntyvät paikallisesti luonnollisten prosessien seurauksesta [12, s. 339]. Lisäksi ilmakehässä on kaasuja, jotka ovat joutuneet sinne ihmisten toiminnasta, kuten teollisuuden päästöt [12, s. 339]. Betonin ja etenkin teollisuusrakentamisen kannalta tärkeimpiä kaasuja ovat rikki- ja hiilidioksidi, joita usein on teollisuusympäristössä ja jotka reagoivat betonin kalsiumhydrioksidin kanssa [3, s. 53] [12, s. 339]. Reaktiossa muodostuu kalsiumkarbonaattia, joka puolestaan aiheuttaa betonin karbonatisoitumista, joka johtaa betonin emäksisyyden laskuun ja betoniterästen korroosion aktivoitumiseen [3, s. 53] [12, s. 339]. Hiilidioksidin vahingollisuus betonille perustuu aggressiivisen hiilidioksidin kykyyn saostua vesiliuoksiin, jotka liuottavat betonin kalsiumyhdisteitä [8, s. 133].

Betoniin kohdistuvan kemikaalihyökkäyksen pääasialliset kaasut rikkidioksidi ja hiilidioksidi ovat usein hiili- tai maaöljypohjaisten polttoaineiden tuotteita. Kaasut liukenevat vedessä, muodostaen happamia liuoksia. Kaasut, jotka liukenevat ilmassa, muodostavat usein laimeita liuoksia, jotka eivät ole aiheuttajina betonin vakavalle vaurioitumiselle. Korkeissa rakennuksissa, etenkin savupiipuissa, polttoaineen poltosta aiheutuvat höyryt voivat jäähtyä matkalla ylöspäin ja kondensoituvat rakenteen yläosiin, mikä voi aiheuttaa vaurioitumista betonirakenteissa, haitallisten aineiden pyrkiessä tunkeutumaan betonin pinnoilta betonin sisään. [12, s. 339]

Rikkidioksidi on paljon hiilidioksidia voimakkaampaa, koska se on liukoisempaa vedessä ja voi muodostaa voimakkaampia liuoksia. Se liukenee helposti savukaasuista veden kosketuksissa ja tämän tapahtuessa betonirakenteiden pinnalla vaurioituminen on todellinen riski. [12, s. 339]

## 4. BETONIN KEMIALLISEN RASITUKSEN VAURIOMEKANISMIT SEKÄ VAURIOIUTUMISEN ESTÄMINEN JA HALLINTA

Betonin korroosioksi kutsutaan ulkoisten tai sisäisten tekijöiden aiheuttamia kemiallisia vaurioita. Betonia vaurioittavat kemikaalit vaikuttavat tiettyyn betonin osaan kemiallisesti tai fysikaalisesti ja niiden reagoitavasta riippuen niillä on erilaisia vauriomekanismeja. Luvussa 3 esiteltiin yleisellä tasolla erilaisia kemikaaliryhmiä ja kemiallisia rasituksia, jotka vaikuttavat betonirakenteisiin. Niiden yhteyksissä puhuttiin erilaisista vauriomekanismeista, joita esitellään tässä luvussa. Lisäksi käsitellään fysikaalisia ilmiöitä, kuten betonipinnan kulumista, korkeita lämpötiloja sekä halkeamia, jotka ovat tyyppillisiä teollisuusrakentamisen kohteissa ja jotka voimistavat betonirakenteen vaurioitumista kemiallisten tekijöiden vaikutuksesta. Yhteenvedo erilaisten luvussa 3 esiteltyjen kemikaaliryhmien ja kemiallisten yhdisteiden tyyppillisistä vauriomekanismeista esitetään taulukossa 13.

**Taulukko 13.** Betonin tyyppillisiä vaurioitumismekanismeja erilaisten kemiallisten yhdisteiden vaikutuksesta.

Kemiallinen yhdiste	Tyyppillisiä vauriomekanismeja
Alkali-kiviainesreaktio	paisuttaa
Ettringiitti	paisuttaa
Hapot	liukeneminen, ioninvaihto, biologinen korroosio
Kasvisöljyt	ioninvaihto
Kloridit	betoniterästen korroosio
Sulfaatit	paisuttaa
Hiilidioksidi	karbonatisoituminen

### 4.1 Karbonatisoituminen

Betonin karbonatisoitumisella tarkoitetaan raudoituksen syöpymisistä lisääviä kemiallisia reaktioita [3, s. 53] [5, s. 14]. Betonin emäksisyyden eli pH:n lasku johtuu usein karbonatisoitumisesta [8, s. 111]. Karbonatisoituminen on diffuusion vaikutuksella tapahtuva prosessi, joka tapahtuu betonin mikrorakenteessa [35]. Diffuusio ja läpäisevyys ovat kaksi erilaista tunkeutumismekanismia, mutta ne molemmat tapahtuvat betonin huokosrakenteessa ja siitä syystä betonin läpäisevyyttä voidaan käyttää arvioimaan betonin diffuusiota [35]. Raudoituksen korroosioriskin lisäksi karbonatisoitumisen muita vaikutuksia ovat sementtikiven koostumuksen muuttuminen, huokoisuuden pieneneminen, lujuuden kasvu, läpäisevyyden pieneneminen sekä kutistuman ja viruman kasvu.



[13] [45]. Betonin karbonatisoituminen huomioidaan betonin käyttöikäsuunnittelussa XC-rasitusluokilla [5, s. 13]. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6.

Karbonatisoituminen tapahtuu pääasiallisesti ilman sisältämän hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ) ja betonin kalsiumhydroksidin (CH) tai kalsiumsilikaattihydraattigeelin (C-S-H-geeli) välillä [5, s. 14]. Reaktio tapahtuu useimmiten  $\text{CO}_2$ :n ja CH:n välillä kaikilla ilmatilassa olevilla betonipinnoilla ja sen seurauksena betonin pintakerros neutraloituu [5, s. 14]. Betoni itsessään sisältää  $\text{CO}_2$ :a huokosvedessä sitoutuneena ja vapaata  $\text{CO}_2$ :a huokosis-  
sa [3, s. 53]. CH:n ja  $\text{CO}_2$ :n reaktiosta muodostuu vettä ja kalsiumkarbonaattia ( $\text{CaCO}_3$ ), jonka läsnäolo betonissa pienentää emäksisyyttä betonissa [3, s. 54] [5, s. 14]. Huokos-  
veden  $\text{CO}_2$ :n reagoiessa myös huokosveden kemiallinen koostumus muuttuu, joka vai-  
kuttaa betonirakenteen kemialliseen käyttäytymiseen [3, s. 54], kuten luvun 3.6 mukai-  
seen kloridien sitoutumiseen ja huokosveden kloridien haitalliseen vaikutukseen. Beto-  
nin pH-arvo laskee karbonatisoituneella vyöhykkeellä 8,5 tuntumaan [8, s. 111]. Teolli-  
suusympäristöjen rikki- ja hiilidioksidit reagoivat betonin CH:n kanssa, muodostaen  
 $\text{CaCO}_3$ :a [3, s. 53].

Emäksisyyden lasku puolestaan altistaa betoniteräkset ruostumiselle [3, s. 54] ja kar-  
bonatisoitumista pidetäänkin yhtenä merkittävimmistä betonirakenteiden säilyvyyson-  
gelmistä [5, s. 14]. Karbonatisoituminen hidastuu karbonatisoitumisrintaman edetessä  
syvemmälle betoniin, sillä hiilidioksidin pääseminen karbonatisoitumissyvyyteen vai-  
keutuu mentäessä syvemmälle betoniin [8, s. 112]. Karbonatisoituminen ei itsessään ai-  
heuta betonin rapautumista [31], mutta se voi edesauttaa sitä esimerkiksi karbonatisoi-  
tumiseen liittyvän kutistumisen kautta [3, s. 54].

Karbonatisoituminen etenee tasaisena rintamana betonin pinnalta syvemmälle betonin  
sisään hidastuvalla nopeudella [8, s. 111-112]. Karbonatisoitumisen nopeuteen vaikut-  
tavat kaikista eniten betonin tiiviys ja betonin CH-pitoisuus [5, s. 14]. Karbonatisoitu-  
misen nopeuteen vaikuttavia muita tekijöitä ovat betonin huokosrakenne, karbonatisoitu-  
van aineen määrä, ilman  $\text{CO}_2$ - ja rikkipitoisuus, betonin suhteellinen kosteus, betonin  
jälkihoito sekä betonin lujuusluokka [3, s. 54]. Korkeamman lujuusluokan betoneilla  
karbonatisoituminen etenee huomattavasti hitaammin [3, s. 54] [5, s. 14]. Betoniterästen  
korroosio alkaa karbonatisoitumisrintaman saavutettua raudoituksen pinnan, mikäli be-  
tonissa on myös happea ja vettä [5, s. 16]. Yhteenvedo koostumuksen ja ympäristöolo-  
suhteiden merkityksestä karbonatisoitumiseen esitetään taulukossa 14.

**Taulukko 14.** Betonin koostumuksen ja ympäristöolosuhteiden merkitys karbonatisoi-  
tumisen kannalta. [8, s. 112]

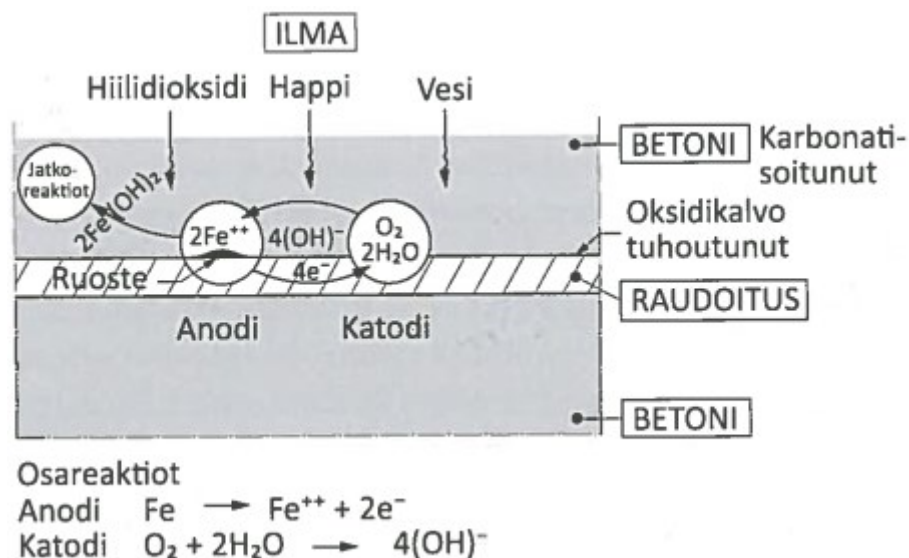
Vaikutus betonin karbonatisoitumiseen		
Erittäin merkittävät	Merkittävät	Merkitys vähäinen
Vesi-sideainesuhde	Lujuus, ikä	Kiviaines
Sementin määrä ja laatu	Hiilidioksidipitoisuus	Rikkidioksidipitoisuus
Betonin huokoisuus	Betonin kosteuspitoisuus	Lämpötila
Betonin tiiviys	Betonipinnan laatu	Rakenteen geometria
Ilmasto-olosuhteet	Sementin hienous	

Tavallisesta portlandsementistä valmistetut betonit sisältävät eniten materiaalia, joka voi karbonatisoitua [35]. Sideaineiden (lentotuhka, masuunikuona, silika) käyttö betonissa kiihdyttää karbonatisoitumissyvyyden etenemistä, koska kaikki kolme yleistä sideainetyyppiä vähentävät portlandiitin osuutta betonissa, jolloin betonissa on vähemmän karbonatisoituvaa materiaalia [35]. Toisaalta niistä tehtävät betonit ovat useimmiten tiiviimpiä kuin tavallisesta portlandsementistä valmistetut, mikä hidastaa karbonatisoitumista [8, s. 113].

Karbonatisoitumista voidaan arvioida laskentakaavoilla, joita on esitetty esimerkiksi teoksessa by 65 Betoninormit 2016 [4]. Visuaalisesti karbonatisoitumista ei pysty näkemään betonin pinnalta, mutta se voidaan määrittää koekappaleella [8, s. 114]. Betonista porataan näyte, joka halkaistaan ja pintaan suihkutetaan fenoliftaleiinin ja alkoholin seosta, joka värjää karbonatisoitumattoman betonikerroksen punaiseksi, karbonisoituneen osuuden pysyessä betonin harmaana [8, s. 114].

## 4.2 Betoniterästen korroosio

Betoniterästen korroosio tarkoittaa betoniteräksinä käytettyjen rautatankojen ruostumista joko karbonatisoitumisen tai kloridien aiheuttamana ja se on sähkökemiallinen ilmiö [8, s. 108]. Karbonatisoitumisen toimintaa ja vaikutusta betoniin on käsitelty luvussa 4.1 ja kloridien vaikutusta betonirakenteeseen luvussa 3.6. Ruostuessaan rauta alkaa muuttua takaisin niiksi yhdisteiksi, jona se esiintyy luonnossa, kuten oksideiksi ja hydroksideiksi [5, s. 13] [8, s. 108]. Korroosio liuottaa materiaalia betoniterästen pinnasta, mikä pienentää raudoitteiden poikkileikkausta [8, s. 108]. Korroosio saattaa aiheuttaa betonin pinnan halkeilua ja lohkeilua, sillä korroosion reaktiotuotteet vaativat alkuperäistä tilavuutta enemmän tilaa, mikä paisuttaa betonia [8, s. 108]. Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen reaktio, jota tapahtuu kosteassa ilmassa karbonisoituneessa betonissa ja vaatii tapahtuakseen sekä vettä että happea [3, s. 68] [5, s. 16]. Reaktio on kaksiosainen ja koostuu anodi- ja katodireaktioista [3, s. 68]. Anodisessa syöpymisessä rauditus liukenee ja katodisessa syöpymisessä raudoituksen vapaat elektronit yhtyvät katodilla veden ja hapen kanssa, joista lopulta muodostuu raudan oksideista koostuvia ruostetuotteita [3, s. 68]. Kuvassa 11 esitetään karbonisoituneen betonin betoniterästen korroosioon kulkua, vaatimuksia sen tapahtumiseen sekä sähkökemiallisen korroosioreaktion kulkua. Raudoitusta suojaava oksidikalvo on tuhoutunut esimerkiksi karbonatisoitumisen seurauksena, jolloin kostean ilman hiilidioksidi, happi sekä vesi aiheuttavat kemiallisen reaktion betoniteräksissä, mikä johtaa niiden ruostumiseen.



**Kuva 11.** Karbonatsoituneen betonin betoniterästen ruostuminen. [8, s. 109]

Normaalisti betoniteräkset ovat hyvässä suojassa betonin kalsiumhydroksidin aiheuttaman emäksisyyden vaikutuksen alaisena [8, s. 108]. Betoniteräksillä on kyky muodostaa tiivis oksidikalvo niiden pintaan emäksisessä ympäristössä [8, s. 108]. Oksidikalvo estää korroosion etenemistä, jolloin teräs passivoituu [8, s. 108]. Betoniterästen korroosio pääsee alkamaan vain, jos sitä ympäröivässä betonissa tapahtuu muutoksia, jolloin betonin fysikaalinen tai kemiallinen suoja katoaa [8, s. 108]. Fysikaalisia muutoksia voivat olla betonin rapautuminen tai halkeilu, kemiallisia karbonatisoituminen ja kloridien tunkeutuminen betoniin [8, s. 108]. Korroosiota ehkäistään estämällä nämä tekijät ja normaali tapa varmistaa korroosiosuoja on betonin riittävä peitepaksuus [8, s. 108]. Korroosiota aiheuttavien aineiden tunkeutuminen vaikeutuu niiden tunkeutuessa syvemmälle betoniin [8, s. 108]. Kuivissa sisätiloissa raudoituksen ruostumista ei juuri tapahdu, kun taas kemiallisen rasituksen aikana raudoitteita suojaava oksidikalvo pääsee tuhoutumaan nopeastikin [3, s. 68]. Oksidikalvon lisäksi betoni tarjoaa fysikaalista suojaa betoniteräksille hidastamalla korroosion kannalta välttämättömien aineiden tunkeutumista betoniterästen läheisyyteen [5, s. 13].

Betoniterästen korroosio alkaa normaalisti joko betonin karbonatisoiduttua tai kloridien tunkeuduttua betoniin [8, s. 109]. Korroosio etenee eri tavoin korroosion alkamistavan mukaisesti [8, s. 109]. Kloridien aiheuttama korroosionopeus on suurempaa kuin karbonatsoituneessa betonissa [8, s. 109]. Kloridit aiheuttavat pistekorroosiota tunkeutuen betoniin ja teräksen pinnalle paikallisesti tasaisen rintaman sijaan, missä ne poistavat raudoitteita suojaavan passiivikalvon paikallisesti [3, s. 69]. Tällä tavoin syöpyvä alue eli anodi on pinta-alaltaan pieni, kun taas vastaava katodi on suuri [8, s. 109]. Lisäksi kloridit liuottavat rautaa, mutta eivät itse kulu reaktiossa [8, s. 109].

Betonin pH-arvon laskettua alle 9 karbonatisoitumisen vaikutuksesta betoniterästen passiivikerros ja sen suojavaikutus häviävät betonista [3, s. 68] [5, s. 13]. Oksidikerroksen tuhouduttua syöpymistä tapahtuu aina kun betonissa on tarpeeksi kosteutta ja happea läsnä [3, s. 68]. Karbonatisoituminen vapauttaa klorideja sementtikivestä, kiihdyttäen

betoniterästen korroosiota [20]. Kloridien aiheuttama korrosio saattaa alkaa myös silloin, kun betoniteräksien ympärillä vielä vaikuttaa emäksinen ympäristö [5, s. 18].

Kloridien tunkeutuminen betoniin on hidas diffuusioon perustuva tapahtuma. Diffuusio-reaktiossa kloridit liikkuvat betonin kokonaan tai osittain vesitäytteisten huokosten välillä huokosten kloridipitoisuuksien vaikutuksesta. Kloridin määrä pienenee tasaisesti betonin pinnalta syvemmälle betoniin mentäessä. Tunkeutumisnopeus riippuu betonin tiivyydestä eli käytännössä vesi-sementtisuhteesta. Kriittinen kloridipitoisuus betoniterästen korroosion alkamiselle on noin 0,03 – 0,07 % betonin painosta. Portlandsementistä valmistetulla betonilla on esimerkiksi masuunikuomasementistä valmistettua betonia korkeampi pH-arvo, jonka vuoksi portlandsementin kriittisen klooripitoisuuden arvo on korkeampi. [8, s. 114-115]

Kloridien aiheuttama betoniterästen korrosio huomioidaan betonin käyttöikäsuunnittelussa XD- ja XS-rasitusluokilla. XS-luokat kattavat meriveden aiheuttaman kloridikorroosion. XD-luokat muiden kloridin lähteiden, kuten jäänsulatusaineiden, aiheuttaman korroosion. Betonin rasitusluokat esitellään luvussa 6. [5, s. 18]

Voimakkainta raudoitusten korrosio on jatkuvan kastumisen ja kuivumisen rasittamassa ympäristössä. Tällöin betonin pintakerrokseen rikastuu klorideja ja kastumisen alussa kloridipitoinen vesi imeytyy kapillaarisesti betoniin. Kuivumisen aikana imeytynyt vesi haihtuu pois, mutta sen tuomat kloridit jäävät betoniin. [3, s. 69]

Mikäli betoni on aina veden kyllästämää, esimerkiksi vedenalaisissa betonirakenteissa, betoniin kulkeutuu happea erittäin hitaasti. Hapen kulkeutuessa betoniin hitaasti korrosiovaara on erittäin pieni. Myös betonin ollessa täysin kuivaa korrosiovaara on pieni, koska kuivassa betonissa korroosion kululle vaadittavaa yhteyttä anodin ja katodin välille ei synny. Suurinta korroosionopeus on ilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 95 % ja suurin korroosioriski on betonin vuoroin kastuessa ja kuivuessa. Lämpötilan nousu lisää korroosionopeutta: 20 °C lämpötilan nousu kymmenkertaistaa korroosionopeuden. [8, s. 109-110]

Halkeamien kohdalla betoni karbonatisoituu voimakkaasti halkeaman alueelta muuta betonia syvemmälle. Kloridien tunkeutuminen avonaisessa halkeamassa tapahtuu erittäin nopeasti. Korroosionopeus oleellisesti kiihtyy, jos halkeaman leveys on yli 0,3 mm, sillä pienemmät halkeamat usein täyttyvät korroosiotuotteilla ja betonista liukenevilla aineilla, mikä puolestaan estää ruostumisreaktioon tarvittavan hapen pääsyn halkeamaan. [8, s. 110]

Korroosiossa syntyvät reaktiotuotteet vaativat noin nelinkertaisen tilavuuden alkuperäisiin reaktiotuotteisiin verrattuna. Korroosiosta aiheutunut suurempi tilantarve aiheuttaa betonia paisuttavia voimia ja aiheuttaa betonin sisäisiä ja ulkoisia halkeamia, jopa lohkaisten raudoituksen koko betonipeitteen pois. Visuaalisesti havaittavien korroosiovaurioiden ilmaantuessa korrosio on edennyt pitkälle ja rakenne vaatii korjausta. Korroosion aiheuttamien raudoitettankojen suuntaisten halkeamien muodostuminen voi aiheuttaa tankojen ankkuroinnin pettämisen. [8, s. 110]

Raudoituksen korroosio pienentää niiden poikkipinta-alaa. Pelkästään poikkipinta-alan pieneneminen harvoin johtaa pääsyynä korjaustarpeeseen. Mikäli korroosion lisäksi betoniin vaikuttaa vetojännitystä, rauditus saattaa syöpyä erittäin nopeasti. Tällöin raudoitteiden syöpymismuotoina ovat jännityskorroosio ja vetyhauraus, jotka ovat erityisesti jänneraudituksen ongelmia. Näiden välttämiseksi jänneraudituksen tulee olla tarpeeksi hyvin suojattu, ettei se pääse menettämään passiivisuuttaan edes paikallisesti. [8, s. 111]

Betoniterästen korroosiota voidaan estää mahdollisimman tiiviillä ja vähähuokoisella betonilla eli hitaasti karbonatisoituvalla betonilla, sekä riittävällä betonin peitepaksuudella. Ruostumattoman betoniteräksen käyttö hidastaa betoniterästen korroosiota (huomattavaa on, että yhdessä rakenteessa tulee käyttää vain samanlaatuisia betoniteräksiä). Betonin huokoisuutta lisääviä (eli betoniterästen korroosioriskiä suurentavia) tekijöitä ovat vesi-sementtisuhteen kohoaminen, betonin puutteellinen tiivistäminen ja jälkihoito sekä betonimassan koostumus. Karbonatisoitumisen sekä kloridien aiheuttaman korroosion korroosionopeudet ovat verrannollisia ajan neliöjuureen, eli peitepaksuuden puolittaminen pudottaa korroosioon kuluvaan aikaan neljäsosaan. Tämän lisäksi halkeamaleveydet vaikuttavat korroosion etenemiseen ja halkeilua hallitsemalla voidaan estää korroosion etenemistä. Halkeamisriskiä voidaan pienentää valitsemalla sopiva betonipeite ja huolehtimalla sen kunnosta. Betonirakenteiden käyttöikä paranee merkittävästi pitkäaikaiskuormien halkeamisleveyksien ollessa rajoitettuna 0,2 mm. Kemiallisesti rasitetulla betoneilla suositellaan halkeamaleveysrajaksi 0,10 – 0,15 mm huomattavasti kohonneiden rasiutusten johdosta. [3, s. 69-70,72]

Vähäinen betoniteräksen ruostuminen korroosion seurauksena (korroosiosyvyys luokkaa 100  $\mu\text{m}$ ) ei vaikuta merkittävästi betonirakenteen käyttöikään [5, s. 16]. Betonin käyttöikäsuunnittelun kannalta betonirakenteen käyttöiän katsotaan päättyneen betoniterästen korroosioon, kun karbonatisoitumisrintama on saavuttanut ulommaisten betoniterästen tason [5, s. 16]. Tämän jälkeen korroosio muuttuu aktiiviseksi ja kestää vuosia ennen kuin rakenteessa havaitaan vaurioitumista [5, s. 16]. Aktiivisen korroosion kesto riippuu kosteusolosuhteista ja sitä voidaan käyttää arvioimaan rakenteen jäljellä olevaa käyttöikää [5, s. 16]. Betoniterästen korroosion voi havaita visuaalisesti vasta pitkään kestäneen korroosiovaiheen jälkeen, betoniterästen suuntaisina halkeamina tai lohkeamina [8, s. 111].

Teollisuudessa käytettävissä betoneissa on normaalisti hieman korkeampi betonin lujuusluokka, mikä tarkoittaa matalampaa vesi-sementtisuhdetta ja näin tiiviimpää betonia, joten terästen korroosio itsessään ei normaalisti nouse ongelmaksi. Vaurio voi syntyä kemikaalien vahingoittaman betonin menettäessä tiiviysominaisuuksiaan ja tämän seurauksena betoniteräket voivat altistua korroosiolle.

### 4.3 Betonin liukeneminen

Liukenemisella tarkoitetaan kemiassa liunneen aineen sekoittumista liuottavan aineen kanssa. Nestemäisen aineen liuottaessa kiinteää ainetta, kiinteän aineen kiderakenne

muuttuu huomattavasti. Liukenemisessa syntyvä liuos on kylläinen, mikäli siihen on liuennut suurin mahdollinen määrä liukenevaa ainetta tietyssä lämpötilassa. [10]

Betonin liukeneminen on diffuusioreaktioon liittyvä ilmiö, joka tapahtuu betonin altistuessa huonosti mineraaleja sisältävälle tai happamalle vedelle. Betonin vaurioituminen koostuu kalsium- ja hydroksidi-ionien liukenemisesta pois sementtikiven rakenteesta, mikä aiheuttaa huokoisuuden lisääntymistä sekä lisää betonipinnan kuljetusominaisuuksia. Happamat ja neutraalit liokset nopeuttavat betonin liukenemistä ja siihen voi liittyä kloridi-, sulfaatti- tai magnesiumionien tunkeutumista betoniin. Liuennut portlandiitti mahdollistaa sulfaatti-ionien tunkeutumiseen betoniin, jossa ne pääsevät reagoimaan hydrataatituotteiden kanssa paisumista aiheuttaviksi reaktiotuotteiksi, kuten kipsiksi ja ettringiitiksi. Tätä voidaan välttää käyttämällä lentotuhkaa tai masuunikuonaa sisältäviä, sulfaatinkestäviä sementtejä. Ilmiö tulee huomioida betonirakenteissa, jotka ovat kosketuksissa pohjaveteen, teollisuuden jätevesiin tai muihin happamiin liukoksiin. [56]

Betonin liukeneminen voimistuu korkeammilla vesi-sementtisuhteilla huokoisuuden ja diffuusion noustessa [56]. Betonin liukenemistä voidaan pienentää käyttämällä betonin sideaineessa 40 - 50 % lentotuhkaa [64], 70 % granulitua jauhattua masuunikuonaa [65] tai 10 % silikaa [29]. Tämä vaikutus perustuu pienempään portlandiitin muodostumiseen sementissä [56]. Näiden käytöllä saavutetaan läpäisemätön C-S-H-geelin sisempi alue matalalla Ca / Si – suhteella, millä on loistavat ominaisuudet liukenemisen vastustamiseen [29]. Pienen alkalimäärän sisältävät sementit kestävät liukenemistä paremmin [29]. Liukenemisen vaikutuksista betonin mikrorakenteeseen johtuen, liukeneminen yleensä kiihtyy sen edetessä [29].

Betonin hydrolyysireaktiot aiheutuvat pehmeän veden vaikutuksesta betoniin. Betonin ollessa kosketuksissa pehmeän veden kanssa, pehmeä vesi saattaa liuottaa ja hajottaa kalsiumia sisältäviä hydrataatituotteita, kunnes kemiallinen tasapaino on saavutettu. Kovettuneen sementtikiven osa-aineista kalsiumhydroksidi (CH) on herkin hydrolyysille ja sen liukeneminen betonista pois on pääasiassa esteettinen ongelma. Liuennut kalsiumhydroksidi muodostaa ilman hiilidioksidin kanssa reagoidessaan kalkkikärhämäksi kutsuttua kalsiumkarbonaattia betonirakenteen pinnalle, jolla ei ole sementtikiven kaltaisia lujuusominaisuuksia. [8, s. 132]

Betonin liukenemistä aiheuttavat erityisesti hapot ja muut happamat orgaaniset yhdisteet, joita on käsitelty luvussa 3.3.1. Betonia voidaan suojata aggressiivisilta hapoilta vain pinnoittamalla [8, s. 133]. Hieman heikommilta liukenemistä aiheuttavilta yhdisteiltä betonia voidaan suojata tiiviillä koostumuksella.

## 4.4 Ioninvaihto

Ioninvaihdossa metalli-ionit siirtyvät liuksesta hartsiin [66] eli kemiallisten aineiden kiinteään tai jähmeään seokseen. Ioninvaihtimet ottavat liuksesta valikoituja ioneja ja luovuttavat niiden tilalle ekvivalenttimäärän toisia ioneja [66]. Ioninvaihto on kaksisuuntainen reaktio ja se voi kulkea toiseen suuntaan liuksen ollessa kylläinen [66].

Betonin ioninvaihdossa kemikaalit, kuten hapot, muuttavat sementin kalsiumyhdisteet kyseisten aineiden kalsiumsuoloiksi, joilla ei ole vastaavia sideaineominaisuuksia. Kalsiumsuolat liukenevat pois betonista, jolloin sementtikiven sisäinen rakenne turmeltuu. Vahvojen liuosten aiheuttamat ioninvaihtoreaktiot syövyttävät kaikkia sementtikiven yhdisteitä, kun taas heikommat liuokset syövyttävät vain kalsiumhydroksidia (CH). Betonin ioninvaihto on pääasiassa happojen aiheuttama vauriomekanismi ja se liittyy liukenemiseen. [8, s. 132]

Betonin vaurioitumisnopeus riippuu aineen aggressiivisuudesta, määrästä sekä virtauksesta. Joidenkin happojen vaikutuksesta betonin pintaan muodostuu niin vaikealiukoinen saostumakerros, että betonin korroosio pysähtyy. Ioninvaihtoreaktiot tapahtuvat pääosin betonin pinnassa, jossa sementtikiven rakenne turmeltuu täysin. [8, s. 132-133]

Aggressiivinen hiilidioksidi on vaarallista betonille sen vesiliuoksen kalsiumyhdisteitä liuottavan vaikutuksen ansiosta [8, s. 133]. Vastaavasti jätevesissä yleisempi ammoniumioni ( $\text{NH}_4^+$ ) osana vesiliuosta liuottaa betonin kalsiumyhdisteitä [8, s. 133]. Magnesium-ionit ( $\text{Mg}^{2+}$ ) muuttavat sementin kalsiumyhdisteitä ioninvaihdon kautta vastaaviksi magnesiumyhdisteiksi, joilla ei ole alkuperäisiä yhdisteitä vastaavia sideaineominaisuuksia [5, s. 23]. Magnesium-ioni saostuu betonin huokosiin magnesiumhydroksidina ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) [5, s. 23].

Betonin ioninvaihtoreaktioihin osallistuvat erityisesti vahvat epäorgaaniset hapot [8, s. 132]. Muita mainittavia kemikaalityyppejä ovat ammoniumyhdisteet, magnesiumyhdisteet sekä kasvisöljyt [5, s. 90-93]. Ioninvaihdon estämiseksi suositellaan mahdollisimman tiivistä betonia [8, s. 133]. Voimakkaiden aineiden ioninvaihtoreaktioilta betonia voidaan suojata vain pinnoittamalla [8, s. 133].

## 4.5 Betonin tilavuudenmuutokset

Betonin tilavuudenmuutokset voivat olla joko kutistavia tai laajentavia. Betonin tilavuudenmuutoksille on kolme pääasiallista syytä: betonista poistuu vettä, betonissa tapahtuu kemiallisia reaktioita tai valetun betonirakenteen lämpötila muuttuu [41, s. 12]. Betonin tilavuudenmuutoksia ovat kutistuminen, viruma ja paisuminen.

Betonin kutistumista ja virumaa ei tässä työssä käsitellä yksityiskohtaisesti, sillä betonin kemiallisesti aiheutuvat tilavuudenmuutokset ovat tilavuutta kasvattavia eli paisuttavia [8, s. 75]. Kutistumisen eri tyyppejä ovat plastinen kutistuminen ja plastinen painuminen, kuivumiskutistuminen sekä autogeeninen kutistuminen. Betonin kutistuminen liittyy aina veteen ja sen määrään betonissa, joko vasta valetussa tai kovettuneessa betonirakenteessa. Eri kutistumistyyppit liittyvät betonin hydrataation eri vaiheisiin. Kuivumiskutistuminen liittyy hydrataation myöhäisvaiheeseen ja muut tyypit tuoreeseen betoniin. Kuivumiskutistuminen on yleensä pääasiallinen kutistumisen muoto betonirakenteissa, sillä muut voidaan minimoida betonin koostumuksen ja tehokkaan jälkihoidon avulla. Betonin kutistumistyypeistä, niiden syistä ja mekanismeista voi lukea lisää esimerkiksi teoksesta by 67 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta 2016. [41, s. 12-24]

Betonin tilavuuden laajentumista eli paisumista tapahtuu, kun betonin sisäiset kemialliset reaktiot tapahtuvat ja tuottavat reaktiotuotteita, joiden tilavuus on suurempi kuin alkuperäisten ainesosien tilavuus. Esimerkiksi sulfaattihyökkäyksen yhteydessä muodostuneen ettringiitin tilavuus on alkuperäisten reaktiotuotteiden tilavuutta huomattavasti suurempi, joten sen muodostuminen johtaa betonin sisäisiin pakkovoimiin [56]. Pakkovoimat aiheuttavat betoniin sisäisiä vetojännityksiä. Tilavuuskasvun aiheuttamien vetojännitysten ylittäessä betonin vetolujuuden, betoni alkaa halkeilla ja rapautua [8, s. 133]. Betonin halkeilu helpottaa haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin edelleen, altistaen betonin entistä voimakkaammille rasituksille [8, s. 133].

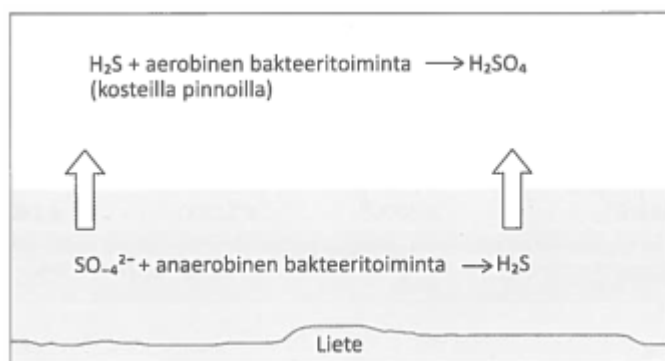
Betonin paisuminen on haitallista, kun sitä tapahtuu kovettuneessa sementtipastassa ja aiheuttaa sementtikiveen ulkoisia tai sisäisiä halkeamia [16]. Sementtipastan ollessa plastisessa muodossa, sementtipastan tilavuutta laajentavien reaktiotuotteiden synty ei yleensä vahingoita betonia sen kovettuttua [16]. Betonin tilavuudenmuutoksista aiheutuva rapautuminen ilmenee monenlaisina erityyppisinä halkeamina vauriotavasta riippuen [8, s. 103]. Betonin tilavuudenmuutoksista muodostuneita erityyppisiä halkeamia on esitelty luvun 4.9 kuvassa 13 ja taulukossa 15.

## 4.6 Biologinen korroosio

Biologiseksi korroosioksi (engl. biogenic sulfuric acid corrosion, BSA [45]) kutsutaan tuulettamattomassa jätevesisäiliössä, -altaassa tai viemärissä kostean ilmatilan pinnoilla elävien bakteerien toiminnasta johtuvaa korroosiota [5, s. 27]. Biologinen korroosio on monimutkainen ilmiö ja eräs haitallisimmista rasitusmekanismeista betonirakenteille [67]. Normaalisti betoniviemäreillä ei ole kestävyysongelmia, mutta ongelmia saattaa esiintyä viemärijärjestelmissä tiettyjen ehtojen täytyttyä [12, s. 327]. Mikäli happi loppuu viemäristä, säiliöön kehittyy lietekerros [5, s. 28] ja ilmassa olevat hyödylliset bakteerit passivoituvat ja rikkivetyä ( $H_2S$ ) alkaa muodostua anaerobisen bakteeritoiminnan johdosta [12, s. 327]. Virtaavan veden pH-arvo vaikuttaa muodostuvan rikkivedyn määrään – eniten rikkivetyä muodostuu hieman emäksisellä pH:lla, kun taas pH-arvon ollessa alle 5 tai yli 10 rikkivetyä ei juuri muodostu [12, s. 327]. Huomattavaa tosin on, että pH:n ollessa voimakkaasti hapan, happaman veden aiheuttamaa betonin korroosiota, kuten betonin liukenemista, voi tapahtua.

Rikkivety ei vahingoita betonia, mutta se vapautuu ilmaan ja liukenee märkiin betonipintoihin, jotka ovat vedenpinnan yläpuolella – viemärin virratessa vettä täytenä ongelmia ei ole [5, s. 28] [12, s. 327]. Betonipinnoilla elävät bakteerit hapettavat rikkivedyn rikkihapoksi ( $H_2SO_4$ ) [5, s. 28] [12, s. 327] [67]. Rikkihappo betonin pinnassa syövyttää betonia aggressiivisesti ja tuhoaa betonia kerroksittain altistetuista paikoista [12, s. 327]. Rikkihappo reagoi betonin portlandiitin ja C-S-H-geelin kanssa [45]. Portlandiitti ja C-S-H-geeli liukenevat pois betonista, kipsin saostuessa niiden tilalle [45]. Ilmiö heikentää betonia, koska kipsillä ei juuri ole kestävyysominaisuuksia [45]. Kuva 12 havainnollistaa biologisen korroosion syntymistä.





**Kuva 12.** Biologisen korroosion syntyminen suljetussa jätevesialtaassa. [5, s. 27]

Rikkivedyn muodostumista nopeuttavat viemärin ikääntyminen, matalat pudotukset viemäriin, pitkä putkisto, matalat virtausnopeudet ja pitkät välit pumppausten välillä [12, s. 328]. Ilmiötä ei pystytä hallitsemaan betoniteknisin keinoin, vaan parhaaksi todettu keino on järjestää riittävä tuuletus, jolloin rikkivety poistuu viemäristä [5, s. 28]. Samalla jäteveden happipitoisuus lisääntyy sekä betonipinnat kuivuvat, joka estää rikkivedyn hapettumisen bakteerien vaikutuksesta [5, s. 28]. Putkiston kaltevuus voidaan järjestää niin, että jätevedellä on riittävä virtausnopeus, eikä lietettä pääse syntymään putken pinnalle [8, s. 136]. Voidaan myös käyttää esiasennettua, kumitiivisteellistä putkea, jolloin putkien saumoista ei pääse vuotamaan vettä ilmatilassa oleville betonipinnoille [8, s. 136].

Betonirakenteiden suojaamista biologiselta korroosiolta on tutkittu ja esitetty vaihtoehtoja, mikäli tuuletuksen järjestäminen ei ole vaihtoehto. Pinnoittaminen on todettu hyväksi vaihtoehdoksi suojaustason kannalta [68], mutta myös erilaisten betonityyppien ominaisuuksia hyökkäyksen sietämiseen on selvitetty [67]. Silikaa sisältävät betonit ovat yleisesti parhaita biologisen korroosion torjuntaan, mutta niidenkään kohdalla ei voida puhua hyvästä suojaustasosta [67] [68]. Epoksinpinnoitteet tarjoavat kestävä ja varman tavan suojata betonirakenteita biologiselta korroosiolta [68]. Lisäksi on kehitteillä mikrobeja hylkiviä pinnoitteita ja betonin sideaineita [68]. Uusimpia suojakeinoja ovat nanomateriaaleihin perustuvat betonin sideaineet ja betonien pinnoitteet, joiden suojauskyky biologista korroosiota vastaan näyttää alustavien tutkimusten mukaan erinomaiselta [69].

## 4.7 Betonipinnan kuluminen

Betonirakenteiden pintoja kuluttavia ilmiöitä ovat liikenteestä ja virtaavan veden vaikutuksesta tapahtuvat rasiutukset. Näitä ovat abraatio, kavitaatio ja eroosio. Abraatiota tapahtuu tyypillisesti esimerkiksi teollisuuslaitosten betonilattioissa, joissa lattian pinta kuluu raskaiden ajoneuvojen vaikutuksesta. Kavitaatiossa neste, kuten vesi, alkaa kiehua alipaineen vaikutuksesta ja nopeasti virtaavan veden vaihtaessa virtaussuuntaa betonin pinnalle muodostuu kavitaatiokuplia, jotka luhistuvat ja murentavat betonin pintaa. Kavitaation vaurioittama betonipinta on rosainen. [8, s. 102]

Eroosio tarkoittaa virtaavan veden (tai liuoksen) aiheuttamaa rasitusta. Rasitus on sekä fysikaalista että kemiallista. Eroosion vauriomekanismina toimivat veden mukana kuljettuneet kiinteät ainekset [8, s. 102]. Eroosion voimakkuuteen vaikuttaa veden sisältämien betonia rasittavien yhdisteiden määrä ja muoto, virtausnopeus sekä betonipinnan muoto ja laatu [8, s. 102] [37]. Eroosion vaurioittama betonipinta on sileä [8, s. 102]. Hyvälaatuinen betoni yleensä kestää eroosion vaikutuksia hyvin, mutta mikäli virtaus muuttuu tasaisesta ja yhdensuuntaisesta nopeasti virtaavaksi ja pyörteiseksi virtaukseksi, kavitaatiota saattaa esiintyä [8, s. 102].

Happaman veden aiheuttamaa betonin vaurioitumista lisää virtaava liuos, johon suolat liukenevat nopeammin kuin seisovaan liuokseen [8, s. 132]. Kavitaatio on eroosiota huomattavasti rasittavampi virtaustyyppi [8, s. 102]. Virtauksen aiheuttamaa betonin kulumista voidaan ehkäistä varmistamalla betonirakenteen pinnan riittävä lujuus [8, s. 102]. Betonipinnan kulutuksenkestävyys paranee betonin puristuslujuuden sekä ki-  
viaineksen raekoon, kovuuden ja suhteellisen tilavuuden suurentuessa [8, s. 102].

## 4.8 Korkea lämpötila

Lämpötilarasitus harvoin liittyy kemikaaleihin, mutta sitä käsitellään tässä, sillä korkeat lämpötilat liittyvät teollisuuden tuotantolaitoksiin. Korkeat lämpötilat tulee huomioida betonirakenteiden suunnittelussa, erityisesti lämpötilan muuttuessa nopeasti, lämpötilaerojen kohdistuessa eripuolille samaa betonirakennetta tai pinnoitettujen betonirakenteiden ollessa normaalia korkeammassa lämpötilassa.

Betoni kestää yleensä hyvin korkeita lämpötiloja. Hetkellisessä altistuksessa betoni kestää erittäin korkeita lämpötiloja, mutta mikäli betoni altistuu jatkuvalle korkealle lämpötilalle, suurimpana sallittuna arvona tavalliselle betonirakenteelle voidaan pitää noin 200 °C:een lämpötilaa. Tavalliset betonit alkavat menettämään ominaisuuksiaan jatkuvassa yli 200 °C:een lämpötilassa, jolloin niissä tapahtuu fysikaalisia ja kemiallisia reaktioita. Tavallisen betonin sulamispisteenä on runkoaineesta riippuen noin +1300 – 1500 °C. Erikoisbetonia voidaan valmistaa kestäväksi erittäin korkeita, jopa yli 1200 °C:een lämpötiloja. Lämpötilan noustessa betonin lujuus ja tiiviysominaisuudet lähes poikkeuksetta huononevat. Erityisen haitallinen on tila, jossa betonirakenteen eri osien välillä on kovettumisvaiheessa merkittävä lämpötilaero, jolloin betoniin voi syntyä halkeamia herkästi lämpötilaeron aiheuttamista vetojännityksistä. [8, s. 105,120-121,127]

Sementtikiven ominaisuudet alkavat muuttua korkeissa lämpötiloissa erityisesti dehydrataation eli hydrataation vastareaktion seurauksena. Vettä poistuu alemmissa korkeissa lämpötiloissa ensin betonin pinnoilta, ja lämpötilan kohotessa myös rakenteellisesti sitoutunut vesi alkaa poistua sementtikivestä. Betonin huokosvesi voi höyrystyä yli 200 °C:n lämpötiloissa (erityisesti lämpötilan muuttuessa nopeasti), jolloin vesihöyryn suurempi tilavuus aiheuttaa betoniin sisäistä painetta, joka voi johtaa betonin lohkeiluun. Veden poistumisen seurauksena sementtikiven tilavuus voi muuttua kutistumalla tai paisumalla sekä aiheuttaa jännityksiä betoniin, jotka alentavat betonin lujuutta. [8, s. 120-121]

Tavanomaisen betonin pituuden lämpötilakerroin  $\alpha$  on  $10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  luokkaa. Alle kahden vuorokauden ikäisen betonirakenteen pituuden lämpötilakerroin on moninkertainen tähän arvoon verrattuna. Rakenteen jäähtyminen ensimmäisten vuorokausien aikana saattaa johtaa laajaan halkeiluun betonirakenteissa, erityisesti laatoissa. Tämä aiheuttaa herkästi pysyviä vaurioita betoniin sen matalan varhaislujuuden vuoksi. [41, s. 13]

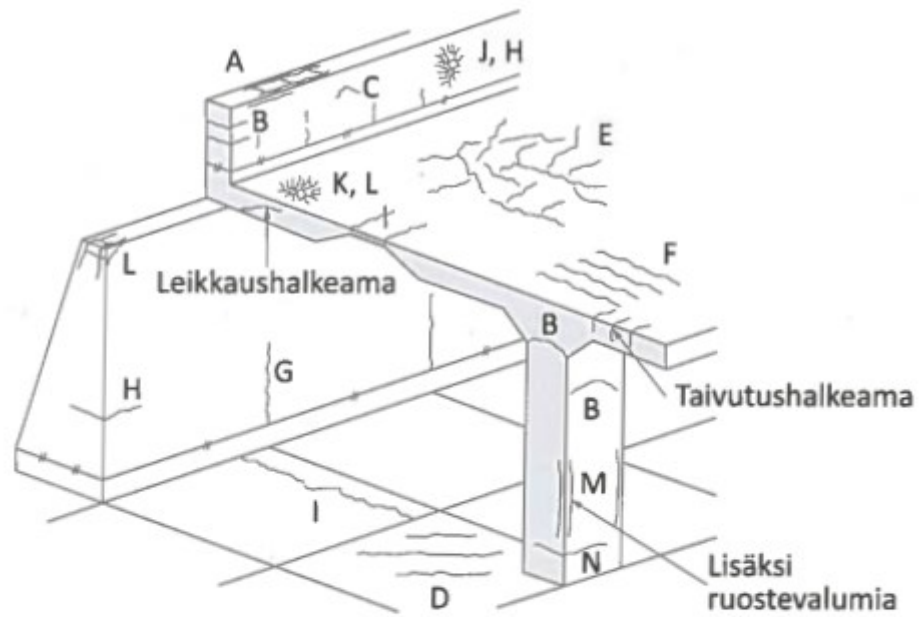
Betonissa tapahtuvissa kemiallisissa reaktioissa usein syntyy lämpöä, joka myöhemässä vaiheessa poistuu rakenteesta, aiheuttaen rakenteen jäähtymistä ja potentiaalisesti pakkovoimia. Varhaisvaiheen lämpöhalkeilu on ennustettavissa ja siihen voidaan puuttua huolellisella suunnittelulla. Suunnittelussa tulee huolehtia halkeilurauodoitteista sekä liikuntasaumoista ja niiden toimivuudesta. Sideaineiden käytöllä voidaan rajoittaa rakenteen lämpötilan nousua varhaisvaiheessa. [41, s. 27,66]

Kohteisiin, joissa pinnoitettuihin betonirakenteeseen tulee läpivientejä lämpimien tai kuumien aineiden kuljettamiseen tulee kiinnittää huomiota. Betonirakenteiden pinnoitteet kestävät lämpöä huonosti, niiden suhteellisen alhaisen ( $50 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pehmenemislämpötilan (engl. heat distortion temperature, HDT) johdosta (katso luku 5.2.). Pinnoitettuihin tai pinnoitettaviin rakenteisiin läpivientejä suunniteltaessa tulisi jo betonivalun yhteydessä asentaa läpivientikaulus tai –muhvi estämään lämmön siirtymisen putkesta betonin pinnoitteeseen. [70, s. 21,35]

## 4.9 Halkeamat

Betonin halkeilu aiheutuu betoniin kohdistuvien vetojännitysten ylittäessä betonin vetolujuuden. Halkeamat voivat syntyä kuormituksen tai betonin tilavuuden muutoksista. Halkeamien muodostumisvaikutukset voivat olla kumulatiivisia ja vaatia useamman kuin yhden rasittavan mekanismin ennen halkeilun syntyä, mikä voi vaikeuttaa halkeaman alkuperän toteamista. Halkeilusta aiheutuvia haittoja ovat rakenteen säilyvyyden ja käyttöiän lyheneminen, korjaustarpeen ja -kustannusten kasvaminen sekä esteettiset haitat. [41, s. 7,46]

Halkeamat voivat syntyä kovettuneessa betonissa lämpötilaerojen, kuivumiskutistumisen, veden jäätymis-sulamissykliin, kemiallisten reaktioiden, tulipalon sekä raudoituksen ruostumisen johdosta tai huonon työsuorituksen tai liian suurien kuormituksen vuoksi [8, s. 102-103]. Halkeilua voi esiintyä myös ennen betonin kovettumista, mutta tällöin halkeamat ovat plastisia halkeamia, jotka eivät yleensä ole haitallisia [41, s. 26]. Plastiset halkeamat ovat seurausta liiallisesta veden erottumisesta sekä muodonmuutoksen paikallisesta estymisestä [41, s. 65]. Plastisia halkeamia on vaikea ennustaa, mutta niiden muodostumista voidaan ehkäistä kasvattamalla betonipeitettä ja jälkitärytyksellä [41, s. 65]. Erilaisia halkeilutyyppisiä ja niiden aiheuttajia on esitetty kuvassa 13 ja taulukossa 15, joiden kirjaintunnukset vastaavat toisiaan.



Halkeilutyyppi	
Plastinen painuma	A, B, C
Plastinen kutistuminen	D, E, F
Lämpöliike	G, H
Kuivumiskutistuma	I
Pintahalkeilu	J, K
Pakkasrapautuminen	L
Raudotteiden korroosio	M
Alkali-kiviainesreaktio	N

**Kuva 13.** Halkeilutyyppit ja niiden sijainti betonirakenteessa. Halkeilutyyppien selityksiä on esitetty taulukossa 15. [8, s. 103]

**Taulukko 15.** Betonirakenteiden halkeilun syyt, halkeilutyypit ja keinoja halkeilun vähentämiseksi. [8, s. 104]

Halkeilun aiheuttaja / halkeilutyyppe	Tunnus		Halkeilun sijainti yleensä	Ensisijainen aiheuttaja	Toissijainen aiheuttaja	Parannuskeino	Syntyaika valusta
Plastinen painuma	A	Raudoituksen päällä	Syvät rakennusosat	Liiallinen vedenerottuminen	Nopea kuivuminen, liian myöhään aloitettu jälkihoito	Vedenerottumisen vähentäminen tai jälkitärytys	10 min...3 h lämpötilasta riippuen
	B		Pilarien päät				
	C	Paksuuden muutos	Ripalaatat, kuppiholvit				
Plastinen kutistuma	D	Diagonaalinen	Laatat	Nopea kuivuminen	Hidas haihtuvan veden korvautuminen (tiivis massa), liian myöhään aloitettu jälkihoito	Jälkihoidon aikaistaminen ja tehostaminen	30 min...6 h lämpötilasta riippuen
	E	Satunnainen	Raudoitettut laatat				
	F	Raudoituksen päällä	Raudoitettut laatat	Nopea kuivuminen tai rauditus lähellä pintaa			
Lämpötilanmuutokset varhaisvaiheessa (jäätyminen)	G	Ulkoisesti estetty muodonmuutos, pakkovoimat	Paksut seinät	Liiallinen lämmöntuotto	Rakenteen liian nopea jäähtyminen	Lämmön vähentymisen ja/tai eristys	1...3 d
	H	Sisäisesti estetty muodonmuutos, pakkovoimat	Paksut laatat	Suuret lämpötilaerot			
Pintahalkeilu	J	Muotteja vasten	Seinät	Tiivis muotti	Huono jälkihoito, betonin suuri sementti- ja vesimäärä	Jälkihoidon parantaminen ja viimeistely	1...7 d tai myöhemmin
	K	Koneellinen hierto	Laatat	Liiallinen hierto, liian aikainen hierto tai liiallinen ilma betonissa			
Pakkasra-pautuminen	L	Vesi, jäätyminen ja sulaminen	Ulkobetonirakenteet	Liian vähän suojahuokosia, betoni vedellä kyllästynyt		Suojahuokosten lisääminen, lujuuden lisääminen	Useita vuosia
Raudoitteiden ruostuminen	M	Karbonatisoituminen Kloridirasitus	Pilarit ja palkit laatat seinät jne.	Riittämätön betonipeite	Betonin huono laatu	Syiden poistaminen	Useita vuosia
Alkali-kiviainesreaktiot	N			Reaktiivinen kiviaines, korkean alkalipitoisuuden sementti		Syiden poistaminen	Yli 5 vuotta

Halkeamien muodostumismekanismi on monimutkainen. Sillä ei välttämättä ole yhtä ainoaa syytä betonin halkeamisen taustalla. Halkeamien muodostumiseen liittyy useita ajasta riippuvaisia asioita. Tarkasteltavana aikajaksona halkeama voi kasvaa useasta eri syystä johtuen, kuten kuivumiskutistumisen tai kuormituksen muutoksen vuoksi. Hal-

keamien syitä tarkastellessa on tärkeää selvittää tarkka syy halkeilulle, sillä halkeamien syntyajankohdan sekä halkeilun tyyppin selvittäminen auttaa ratkaisemaan halkeilua aiheuttavan syyn. Syitä voi olla useita ja niistä aiheutuva haitalliseksi luokiteltava halkeilu voi ilmetä vasta pitkän ajanjakson kuluessa. [41, s. 26-28]

Betonisissa lattioissa halkeilun hallitsemiseen tarvitaan riittävää liikunta- ja kutistumisaumojen sijoittelua pakkovoimien minimoimiseksi betonirakenteen kuivuessa ja kutistuessa. Saumattomat lattiat toimivat, kun betonin kutistuma saadaan raudoitetussa betonilattiassa pidettyä riittävän alhaisena (suositeltava arvo kutistumalle on  $< 0,5$  mm/m) ja hallittu rakenteen kuivuminen sallitaan. Lattioissa halkeilua voi syntyä vain yhteen suuntaan kutistuman johdosta, joka saattaa pyrkiä taivuttamaan lattioita ylöspäin reunoistaan. Kohonneet reunat ja nurkat halkeilevat herkästi taivutusjännitysten vaikutuksista rakennetta kuormittaessa. [41, s. 41,45]

Betonirakenteen osien väliset lämpötilaerot aiheuttavat jännitystiloja betoniin. Vetojännitystiloja lämpötilan aiheuttamana voi muodostua betoniin esimerkiksi jäähtymisen aiheuttaman kutistumisen seurauksena, muodonmuutoksen ollessa estetty. Betonin hydrataatiossa muodostunut hydrataatiolämpö poistuu betonin pinnan kautta, laskien pinnan lämpötilaa sisemmän alueen lämpötilaan verrattuna. Tämä kovettumisvaiheen lämpötilaero saattaa aiheuttaa halkeamien erityisesti massiivisiin betonirakenteisiin, joiden sisäosan lämpötila pysyy koholla pitkään. Betonin jäähtymisen aikana muodostuvat halkeamat ovat yleensä verkkomaisia pintahalkeamia. Kovettuneessa betonissa ympäristön lämpötilamuutokset voivat aiheuttaa halkeilua ja mikäli ympäristöltä voidaan odottaa lämpötilan vaihtelua, rakenteet tulee suunnitella liikkeitä salliviksi. [8, s. 105]

Halkeilu voi johtua monista eri asioista, mutta raudoitetun betonirakenteen halkeilutyppejä on kahta päätyyppiä: betonin pinnassa havaittavat ensimmäisen luokan halkeamat ja betonin sisäiset toisen luokan halkeamat. Ensimmäisen luokan halkeamat ovat leveimpiä kohdissa joissa ei ole raudoitusta suoraan alla ja kapeimpia raudoituksen päällä. Halkeamaleveys kasvaa jännitysten kasvaessa. Toisen luokan halkeamat ovat betonin pinnan alla olevia sisäisiä halkeamia ja niiden halkeamaleveys myös kasvaa liikuttaessa kauemmas raudoituksesta. Pakkovoimien aiheuttamat tilavuudenmuutokset vaikuttavat näkyvien halkeamien määrään betonirakenteessa. [41, s. 43]

Betonin halkeamat lisäävät merkittävästi betonin läpäisevyyttä ja helpottavat kemikaalien tunkeutumista betoniin, joten halkeamien voidaan katsoa suoraan heikentävän betonin kemikaalikestävyyttä [8, s. 102]. Betonirakenteen staattisen toiminnan, säilyvyyden ja ulkonäön kannalta on tärkeää, että halkeilu tapahtuu hallitusti ja halkeamaleveydet pysyvät pieninä [8, s. 102]. Valitsemalla vähän kutistuva ja kemiallisesti kestävä betoni voidaan pienentää betonin halkeiluriskiä merkittävästi.

Halkeilun kannalta betonin vetolujuus on tärkeä ominaisuus, kuten myös oikeaoppinen ja riittävän pitkä jälkihoito [41, s. 44]. Raudoitteilla ja niiden määrän kasvattamisella ei voi vähentää betonin tilavuudenmuutoksia merkittävästi, mutta raudoittamalla voidaan vähentää betonin halkeamien leveyttä ja määrää [41, s. 44]. Betoniterästen suhteessa pituussuuntaisesti kulkevat halkeamat ovat haitallisempia kuin poikkisuuntaisesti kulkevat

[41, s. 65]. Betonin halkeamaleveys vaikuttaa betoniterästen korroosioon [41, s. 65]. Halkeamaleveyttä on rajoitettu standardissa SFS-EN 1992-1-1 ja yleensä (ei jänneteräksiä, ei raskausluokka X0,XC1) halkeamaleveyden raja-arvona voidaan käyttörajatilassa käyttää kantavissa rakenteissa  $\leq 0,3$  mm [36]. Standardissa esitetään myös halkeamaleveyden laskentaa [36]. Betonilattioissa halkeamaleveytenä käytetään luokan I vaativissa rakenteissa 0,3 mm; luokan II normaaleissa rakenteissa 1,0 mm ja luokan III merkityksettömissä ei ole vaatimusta [8, s. 413]. Halkeamaleveyksiä voidaan rajoittaa myös esteettisistä syistä, mutta niihin standardi ei ota kantaa, joten tapausta tulee arvioida silmä määräisesti tai käyttää erilaisia suosituksia [41, s. 46].

## 5. BETONIN SUOJAAMINEN KEMIKAALEILTA

Betonirakennetta voidaan suojata kemikaalin tai muun kemiallisen yhdisteen aiheuttamalta rasitukselta, mikäli suunnitteluvaiheessa huomioidaan potentiaaliset kemialliset rasitukset. Taloudellisin tapa on usein valita sementin koostumus tiettyä kemikaalia kestäväksi, mikäli tämä on kohteessa mahdollista. Betonin pinnoittaminen on kalliimpaa, mutta pinnoitteilla pystytään suojaamaan betonin pintaa lähes kaikenlaiselta kemialliselta rasitukselta. Pinnoitteita on lukuisia eri tyyppisiä eikä ole olemassa yleisiä standardisoituja pinnoitetyyppejä, joten tässä kappaleessa esitellään betonin pinnoitteita ja niihin liittyviä ominaisuuksia yleisellä tasolla. Käytännön suunnittelussa pinnoitetta valittaessa tulee valita eri valmistajien pinnoitekatalogeista kohteeseen sopiva pinnoite. Muita suojaustapoja ovat betonirakenteiden saumakohtien kemikaalikeston varmistaminen sekä uhrautuva betonikerros, jota tosin harvemmin käytetään ensisijaisena suojausmenetelmänä betonirakenteiden kemikaalisuojauksessa.

Yleisiä suojauskeinoja, jotka pätevät kaikille betonirakenteille ja joita tulisi noudattaa koostumuksen valinnasta tai pinnoittamisesta riippumatta ovat: mahdollisimman tiivis betonirakenne, betonin halkeilun rajoittaminen, betonin kutistuman hallinta sekä ruostumattomasta teräksestä tehdyn raudoituksen käyttäminen. Betonin ollessa tiivistä, haitallisten aineiden tunkeutuminen betoniin vaikeutuu [8, s. 69] [45]. Betonin halkeilu ja kutistuma aiheuttavat betonin pintaan ja sisäiseen rakenteeseen heikkouksia, joiden avulla haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin tiivistä ja ehjää pintaa helpommin. Betonirakenteiden käyttöikä paranee merkittävästi pitkäaikaikuormien halkeamislevyysien ollessa rajoitettuna enintään 0,2 mm:iin [3, s. 70]. Kemiallisesti rasitetulla betoneilla suositellaan halkeamaleveysrajaksi 0,10 – 0,15 mm huomattavasti kohonneiden rasitusten johdosta [3, s. 70]. Ruostumattoman raudoituksen käyttäminen parantaa raudoitteen korroosionkestoa [3, s. 72], mutta huomioitavaa on että ruostumattoman betoniteräslaadun B600KX käyttö ei ole suositeltavaa jännityskorroosion vaikuttaessa kloridipitoisessa ympäristössä [5, s. 18].

### 5.1 Sementin koostumus

Sementin luvun 2.4 mukaiset seosaineet tekevät betonista tiiviimpää verrattuna tavallisesta portlandsementistä valmistettuihin betoneihin. Tiiviys on yleisellä tasolla betonin tärkein ominaisuus kemikaalikestävyysvarmistamiseksi, mutta tiiviys ei yksinään estä kemikaalien haittavaikutuksia. Erityisesti silika tekee betonista huomattavasti tiiviimpää, mutta sitä käytettäessä tulee käyttää myös betonia notkistavia lisäaineita.

Taulukkoon 16 on listattu seosaineiden vaikutuksia tietyn kemiallisen rasisusmekanismin vaikuttaessa. Vaikutukset ovat yleisellä tasolla kemialliseen rasisukseen vaikuttavia



ja tapauskohtaisesti tulee harkita niiden käyttöä ja hyötyjä. Seosaineiden lisäksi tai sijasta rasituksia voidaan ehkäistä pinnoittamalla, sekä tapauskohtaisesti muilla keinoin. Muita keinoja voivat olla esimerkiksi rakenteellisia tai biologisen korroosion tapauksessa tuuletus, joka onkin suositeltavampaa kuin silikan tai pinnoitteen käyttö. Taulukon tyhjät kohdat tarkoittavat, että seosaineella ei ole merkittäviä positiivisia, eikä negatiivisia vaikutuksia tiiviyden parantamista lukuun ottamatta.

**Taulukko 16.** Betonin seosaineiden käytön vaikutukset kemialliseen kestävyYTEEN.

Kemiallinen rasitusmekanismi	Seosaine ja sen vaikutus		
	Lentotuhka	Masuunikuona	Silika
Karbonatisoituminen	Kiihdyttää karbonatisoitumista <sup>1)</sup>	Kiihdyttää karbonatisoitumista <sup>1)</sup>	Kiihdyttää karbonatisoitumista <sup>1)</sup>
Kloridikorroosio	Heikentää kriittistä kloridipitoisuutta <sup>1)</sup>	Heikentää kriittistä kloridipitoisuutta <sup>1)</sup>	Kestävyys paranee tiiviyden parantuessa
Liukeneminen <sup>2)</sup>	40 – 50 % sideaineesta parantaa kestävyttä.	70 % sideaineesta parantaa kestävyttä.	10 % sideaineesta parantaa kestävyttä.
Ioninvaihto	- <sup>3)</sup>	- <sup>3)</sup>	- <sup>3)</sup>
Paisuminen (sulfaatit)	-	Vähintään 70 % sideaineesta estää sulfaattien aiheuttaman paisumisen.	Parantaa kestävyttä lievästi
Biologinen korroosio	-	-	Parantaa kestävyttä lievästi

<sup>1)</sup> Vaikka seosaine heikentää kemiallista kestävyttä, siitä valmistetut betonit ovat usein tiiviimpiä portlandsementtiin verrattuna, mikä puolestaan hidastaa karbonatisoitumisen / kloridikorroosion etenemistä.

<sup>2)</sup> Betonin koostumuksella ei voi estää voimakkaiden happojen aiheuttamaa liukenemistä.

<sup>3)</sup> Mahdollisimman tiivis betoni on pinnoittamisen ohella suositeltava vaihtoehto riippuen rasittavasta aineesta.

## 5.2 Betonin pinnoittaminen

Betonin päällystäminen ja pinnoittaminen ovat eri asioita. Päällystäminen tarkoittaa teollisesti valmistetun, valmiin tai viimeistelyä vaille valmiin tuotteen asennusta betonitai tasoitepinnan päälle (esimerkiksi parketti tai kumimatto). Päällysteen ja betonilattian välissä voi olla lisäkerros, kuten tasoite tai kosteudeneristys. Pinnoittaminen tarkoittaa lattiaan levitettävää pintakerrosta, joka saa tekniset ominaisuutensa vasta levityksen aikana ja sen jälkeen. Päällysteen ja pinnoitteen valinnoissa tulee huomioida rasitusolosuhteet, betonin kosteuden asettamat rajoitukset sekä päällystystyön betonille aiheuttamat rasitukset. [71, s. 32-33]

Tässä työssä käsitellään betonin erilaisia pinnoitetyyppejä ja niiden kemiallista kestävyttä, sillä päällysteillä ei juuri ole kemikaalirasituksia vähentäviä vaikutuksia betoniin. Työssä ei käsitellä yksittäisten pinnoitevalmistajien tuotteita. Betonilattioita joudutaan usein pinnoittamaan teollisuuden kohteissa mekaanisen kulutuskestävyyden paran-

tamiseksi, mutta myös joidenkin kemikaalien kohdalla pinnoittaminen voi olla ainoa järkevä vaihtoehto betonin käyttöiän varmistamiseksi. Tässä työssä käsitellään betonin pinnoittamisella saatavaa mekaanista kulutuskestävyyttä lähinnä ohimennen. Betonin pinnoittaminen kohdistuu normaalisti betonilattioihin, -seiniin tai altaisiin, mutta erittäin vaativien rasitusolosuhteiden johdosta myös rakennuksen rungon betonirakenteiden pinnoittamista voidaan harkita. Käytännön suunnittelussa teollisuuskohteisiin on aina myös huomioitava alueen mekaaniset rasitukset, joita voi tarkastella esimerkiksi eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 [72] pohjalta.

Eristeenä toimivan pinnoitteen tärkein ominaisuus on sen tiiviys, joka riippuu eristeen vesihöyrynläpäisevyydestä [6] [73]. Betonin pinnoite suojaa betonia ympäristön vaikutuksilta [73]. Pinnoite estää aggressiivisten liuosten ja kaasujen kosketuksen betonin pinnan kanssa [73]. Pinnoitteelta vaaditaan yleensä useita ominaisuuksia, jotka pinnoitusta suunniteltaessa on asetettava tarkeysjärjestykseen [70, s. 12].

Teollisuusrakennuksien betonilattioissa esiintyvät ongelmat ovat aiheuttaneet ylimääräisiä kustannuksia seisokkien ja korjausten johdosta, joten oikeanlaiselle rasitukselle suunnitteleminen on tärkeää [73]. Betonilattian pinnoitusta (tai pinnoittamatta jättämistä) suunniteltaessa on tunnistettava kohteen mekaaniset rasitukset, potentiaaliset kemialliset rasitukset, onnettomuuksien (esimerkiksi tavarán putoaminen) aiheuttamat piste-kuormitukset, lämpötilan muutokset (esimerkiksi seisakin aikainen pesu kylmällä vedellä) sekä pinnoitteen ja betonin välinen yhteensopivuus [73]. Pinnoitettavalla betonilattialla tulee olla riittävän alhainen kosteuspitoisuus, jotta pinnoitteeseen ei kohdistu liian suurta kosteusrasitusta, eikä betonilattia kutistu haitallisen paljoa pinnoittamisen jälkeen [70, s. 29]. Mikäli kohteessa vaikuttaa jäätymis-sulamisrasitus, pinnoitteen kesto on varmistettava joko valmistajalta tai tarvittaessa arvioitava laskennallisesti [4, s. 144].

Valtaosa betonilattioiden pinnoitteista on polymeerejä eli aineita, jotka koostuvat monesta yhteen liittyneestä rakenneyksiköstä ja jonka rakenteeseen muutaman yksikön lisäys tai vähennys ei enää vaikuta. Polymeerien ”kovettuminen” tapahtuu levityksen jälkeen ja kovettumisen tuloksena on kovaa käyttöä kestävä saumaton lattiapinta. Polymeerituotteiden sideaineina käytetään seuraavia aineita tai niiden yhdistelmiä: epoksi, polyuretaani, akryyli, sementtipolymeeriseos, vinyyliesteri tai polyurea. Muita pinnoiteryhmiä ovat pölynsidonta- ja imeytyskäsittelyt, elastiset pinnoitteet eli elastomeerit, sementtipohjaiset tasoitteet, bitumipohjaiset tasoitteet sekä betonilattian kulutuskestävyyttä parantavat sirotteet. [70, s. 9,57]

Betonilattiapinnoitteisiin kohdistuvia tyypillisiä rasituksia ovat:

- mekaaninen rasitus (hankaava, pistekuormat, iskut)
- kemiallinen rasitus (kemikaalien väkevyudet, vaikutusajat ja lämpötilat vaikuttavat rasituksen voimakkuuteen)
- fysikaalinen rasitus (neste- ja kaasutiiviys, venymärasitus)
- lämpörasitus (käyttölämpötila, nopeat lämpötilan muutokset eli lämpöshokit ja se onko lämpö kosteaa vai kuivaa lämpöä)
- säärasitus (UV-valon kestävyys). [70, s. 12]

Rasitusten lisäksi pinnoitetta valitessa tulee huomioida:

- pinnoitteen ulkonäkö eli väri, sileys sekä kiiltoaste (kiiltävä / puolikiiltävä / matta)
- turvallisuus eli pinnoitteen kitkaominaisuudet, sähkönjohtavuus, palominaisuudet sekä työnaikaiset vaatimukset
- pinnoitteen huolto ja puhtaanapito eli puhdistettavuus, kunnossapito sekä hygieniavaatimukset
- ympäristöasiat. [70, s. 12]

Betonilattiapinnoitteen kulutuksenkestävyyskyky eli käyttöikä riippuu yleensä suoraan lattiapinnoitteen paksuudesta. Kestävyys vaikuttaa myös käyttöaste (pyörien tyyppi ja kuormitus), puhdistustiheys, mekaaninen kulutus sekä iskut. Teollisuusrakennuksissa käyttöaste voi vaihdella tilojen välillä paljon, jolloin eri tiloihin sopivat erilaiset lattiapinnoitteet. Pinnoitemateriaalit voidaan jakaa koostumuksen ja ominaisuuksien (paksuus ja pinnan viimeistely) perusteella taulukon 17 mukaisiin pinnoitetyyppeihin. Taulukossa 17 esiintyvät pinnoitetyypit 1 – 3 soveltuvat ainoastaan kävelyliikenteelle ja kevyeen teollisuuskäyttöön. Pinnoitetyypit 4 – 8 soveltuvat raskaaseen trukkiliikenteeseen ja erityisesti tyypit 7 ja 8 soveltuvat erittäin raskaaseen käyttöön, joka huomioi myös potentiaaliset iskut. [70, s. 19]

Tyyppien 1 – 3 pinnoitteiden kunto voi heikentyä huomattavasti, mikäli lattian puhtaanapidosta ei huolehdi. Mikäli säännöllinen puhdistus ei onnistu näissä luokissa, on syytä käyttää paksumpaa, esimerkiksi tyyppin 5 pinnoitetta. Pinnoitteiden tulee kovettua valmistajan ohjeiden mukaisesti ennen käyttöä, yleensä noin 1 – 7 päivää käyttötarkoituksesta riippuen: raskasta liikennettä ja kemikaaleja kestävä pinnoite kovettuu pidempään. Akryylipinnoitteet kovettuvat huomattavasti muita pinnoitteita nopeammin, mitä voidaan hyödyntää aikataulun ollessa tiukka. [70, s. 19]

Oikein valittu polymeeripinnoite on tehokas suojaamaan betonia kemikaaliroskeilta. Ohuet (tyyppien 1 – 3) pinnoitteet eivät ole yleensä suositeltavia, sillä alustan epätasaisuudesta johtuen pinnoitekalvo saattaa jäädä paikallisesti ohueksi. Monet polymeeripinnoitteet kestävät hyvin useita teollisuudessa yleisesti käytettäviä kemikaaleja ja tuotteita. Yksikään lattiapinnoite ei kestä pitkäaikaista altistumista kaikista voimakkaimmille kemikaaleille. Käytännössä pitkäaikainen altistuminen erittäin vahvoille kemikaaleille on epätodennäköistä tilanteen aiheuttamien terveysongelmien vuoksi. Lattian ja sen pinnoitteen käyttöikä kemikaalirasituksen alaisena paranee huomattavasti, kun lattia varustetaan riittävällä viemäröinnillä ja pidetään puhtaana. [70, s. 19]

**Taulukko 17.** Betonin polymeeripinnoitteiden tyypit, perustuen [70, s. 15-16] [74]

#	Pinnoitetyyppi	Käyttötarkoitus*	Käyttötapa
1	Pölynsidonta / ohentavat maalit ja lakat	Kevyt käyttö	Levitetään kahtena kerroksena, paksuus < 150 µm, vesi- tai liuotinpohjainen
2	Liuotteettomat maalit ja lakat	Kevyt ja keskiraskas käyttö	Levitetään kahtena tai useampana kerroksena, paksuus > 100 µm / kerros, liuotteeton tai vesipohjainen
3	Liuotteeton pinnoite	Keskiraskas käyttö	Levitetään kahtena tai useampana kerroksena, kokonaispaksuus 300 – 1000 µm, liuotteeton
4	Monikerrospinnoite	Keskiraskas ja raskas käyttö	Levitetään useana kerroksena liuotteetonta maalia tai pinnoitetta. Pintaan sirotellaan kiviaines, kokonaispaksuus > 2 mm. Ns. sandwich-rakenne
5	Itsesiliävä pinnoite	Keskiraskas ja raskas käyttö	Levitetään pohjustetulle alustalle yhtenä kerroksena, paksuus 2 – 3 mm, sileä pinta, tarvittaessa voidaan karhentaa
6	Hierrettävä pinnoite	Keskiraskas ja raskas käyttö	Voimakkaasti täytetty, hierrättävä pinnoite, paksuus > 4 mm, yleensä pintalakattu
7	Itsesiliävä massapinnoite	Raskas ja erittäin raskas käyttö	Täytetty itsesiliävä massapinnoite erittäin kovaan käyttöön, paksuus 4 – 6 mm, sileä pinta, tarvittaessa voidaan karhentaa
8	Hierrättävä massapinnoite	Raskas ja erittäin raskas käyttö	Voimakkaasti täytetty, hierrettävä massapinnoite erittäin kovaan käyttöön, paksuus > 6 mm, tiivis koko paksuudeltaan

\* Käyttötarkoituksiluokkien kuvaukset:

- Kevyt käyttö: pääasiassa kävelyliikennettä ja tilapäisesti myös kumipyöräisiä ajoneuvoja
- Keskiraskas käyttö: säännöllistä kävelyliikennettä, toistuvaa trukkiliikennettä ja satunnaisesti muovipyöräisiä kärkyjä
- Raskas käyttö: jatkuva trukkiliikenne, kovamuovisilla pyörillä varustettuja kärkyjä sekä satunnaisia iskuja
- Erittäin raskas käyttö: jatkuva raskas liikenne ja iskuja

Teollisuuden käyttämien lukuisten erilaisten kemikaalien laajan kirjon sekä lattiapinnoitteiden monimuotoisuuksien vuoksi yksiselitteisiä ohjeita pinnoitteiden kemikaalikestävyydestä ei voi antaa. Lisätietoa kannattaa tiedustella pinnoitevalmistajilta tai urakoitsijoilta, joilla on kokemusta vastaavista ratkaisuista sekä laboratoriotesteistä. [70, s. 20]

Pinnoitteen kemikaalikesto ei kuitenkaan poissulje saman kemikaalin aiheuttamaa pinnan tahraantumista. Tietyt kemikaalit voivat aiheuttaa pinnoitteen värin muuttumista, kuitenkin ilman että tämä vaikuttaa lattiamateriaalin käyttöominaisuuksiin tai kestävyys-teen. Pinnoitteen ulkonäön ollessa tärkeää, tulee varmistaa, että käytettävä pinnoite ei tahraannu ja sietää kyseisen käyttöympäristön kemikaalien aiheuttamia rasituksia. Pinnoitteelta vaadittava kemikaalikestävyys rajoittaa värivaihtoja, koska kemikaalikestoa omaavia väripigmenttejä on rajatusti saatavilla. Jotkin orgaaniset väripigmentit ja pinnoitteiden sideaineet voivat muuttaa väriään pitkäaikaiselle uv-säteilylle altistuessaan. [70, s. 20]

Suunniteltaessa käytettäviä ratkaisuja tarvitaan useita tietoja, tai niiden tietäminen auttaa tarkentamaan pinnoitteen valintaa. Suunnittelija voi tällöin tarvittaessa yhdessä pinnoitteen valmistajan tai urakoitsijan kanssa valita oikean pinnoitteen. Pinnoitteen valintaan tarvittavia tietoja ovat Suomen Betoniyhdistyksen betonilattioiden pinnoitusohjeiden [70, s. 20] mukaisesti:

- kemiallisten aineiden koostumus ja pitoisuudet (mahdolliset roiskeet)
- kemikaalien lämpötila
- kemikaalien vaikutusaika
- roiskeiden määrä, toistumistiheydet ja niiden puhdistustapa
- veden saatavuus ja ohjeet hätätilanteessa tapahtuvaa pesua varten
- säännölliset siivousrutiinit
- kaadot, viemärointi ja lattiakaivot.

Kaikkien betonin pinnoitteiden ja muiden suojausaineiden tulee olla alkalinkestäviä (emäksenkestäviä), sillä betonipinta itsessään on emäksinen [73]. Alkalinkestävyys voidaan määritellä vastaavasti kuin kaikkien muiden kemikaalien kestävyys betonirakenteiden pinnoitteille [73]. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineiden kemikaalikestävyys voidaan määrittää kemikaaleittain standardin SFS-EN 13529 [75] mukaisella tavalla standardin mukaisille kemikaaliryhmille. Betonilattioiden rasitusluokkia on listattu standardissa PSK 2703. Standardin esittelemät rasitusluokat on esitetty taulukossa 18.

**Taulukko 18.** Lattian rasitusluokat ja soveltuvat pinnoitetyypit standardin PSK 2703 mukaisesti. [70, s. 17] [76]

Rasitusluokka	Rasitusluokan kuvaus	Pinnoitetyypit
BC1 Hyvin lievä	Lievä mekaaninen tai kemiallinen rasitus: - kuivat tuotannon sisätilat	Pölynsidonta-aineet Ohennettavat maalit ja lakat Liuotteettomat maalit ja lakat
BC2 Lievä	Kevyt mekaaninen rasitus: - jalankulkuliikenne - vesipesu ja tahrannoisto neutraaleilla pesuaineilla	Liuotteettomat maalit ja lakat
BC3 Kohtalainen	Jatkuva kohtalainen mekaaninen rasitus: - esimerkiksi jatkuvat kevyt liikenne ja satunnainen trukkilienne - kestää vesipesun ja tahrannoiston neutraaleilla pesuaineilla	Liuotteettomat pinnoitteet, kalvonpaksuus > 0,5 mm
BC4 Ankara	Kova mekaaninen rasitus: - esimerkiksi jatkuva haarukkatrukkiliikenne ja pistekuormarasitus - prosessikemikaalien roiske- rasitusta < 30 °C	Itsesiliävät massat, kalvonpaksuus > 2 mm
BC5 – Mec Hyvin ankara, mekaaninen	Erittäin kova mekaaninen rasitus tai lämminvesirasitus: - esimerkiksi jatkuva raskas trukkilienne ja suuri pistekuormarasitus - prosessikemikaalien roiske- rasitusta < 30 °C - lämminvesirasitus 20 – 60 °C	Hiertomassat, kalvonpaksuus > 4 mm, sementtipolymeerimassat
BC5 – Chem Hyvin ankara, kemikaali*	Voimakas kemiallinen rasitus: - väkevät epäorgaaniset hapot ja emäkset < 3 vrk - laimeat orgaaniset hapot ja emäkset < 28 vrk - ajoittainen kuumavesirasitus < 80 °C, lämpöshokit -liuotinrasitus -kohtalainen mekaaninen rasitus	Hiertomassat, kalvonpaksuus > 5 mm Sementtipolymeerimassat Vinyyliesterit Yhdistelmäpolyuretaanit Sideaine ja pintalakka valittava kemikaalirasituksen mukaan
BC6 Erikoisrasitukset*	Erikoisrasitukset: - jatkuva kuumavesirasitus > 90 °C tai höyrypesu	Pinnoite on valittava vallitsevien rasitusten ja vaatimusten mukaan. Vinyyliesterit Yhdistelmäpolyuretaanit
BC7 Johtavat, puolijohtavat ja eristävät pinnoitteet	Johtavat, puolijohtavat ja eristävät pinnoitteet	Pinnoite valittava rasitusten ja vaatimusten mukaan

\* Tuotteen soveltuvuus tarkastettava tapauskohtaisesti materiaalin toimittajalta

Betonilattioiden pinnoitukselta vaadittava ominaisuus voi olla tietyissä prosessiteollisuuden kohteissa sekä elektroniikkateollisuudessa lattiapinnoitteen sähkönjohtavuus [70, s. 20]. Lattiapinnoitteiden sähkönjohtavuutta kuvataan resistanssilla maahan [76]. Sähköä johtavia pinnoitteita käytettäessä lattian puhtauteen ja puhdistukseen käytettävään aineisiin tulee kiinnittää erityistä tarkkuutta [70, s. 20]. Mikäli tilassa käsitellään syttyviä nesteitä, lattiapinnoitteen resistanssi maahan tulee olla alle 100 MΩ [76]. Lattiapinnoitteiden resistanssi muuttuu iän mukana, mitä tulee seurata kyseisen ominaisuuden ollessa tärkeä [76]. Taulukossa 19 esitellään lattioiden luokituksia resistanssin mukaan.

**Taulukko 19.** Lattioiden luokitus resistanssin mukaan. [76]

<b>Prosessiteollisuus</b>	<b>Resistanssi maahan</b>	<b>Mittausmenetelmä</b>
Johtava (< 500 V asennus)	≤ 50 kΩ	SFS 6000-6-61
Johtava (> 500 V asennus)	≤ 100 kΩ	SFS 6000-6-61
Puolijohtava	> 50 kΩ – 1 GΩ	SFS 6000-6-61
Eristävä	> 1 GΩ	SFS 6000-6-61
<b>Elektroniikkateollisuus</b> Staattista sähköä poistava	< 1 GΩ	SFS-EN 61340-4-1

Useimmilla synteettisillä lattiapinnoitteilla on suhteellisen alhainen (50 – 100 °C) pehmenemislämpötila (engl. heat distortion temperature, HDT). Tiedetyt polymeeripinnoitteet, kuten yhdistelmäpolyuretaanit, vinyyliesteripinnoitteet sekä sementtipolymeerit, kestävät sideaineen HDT:tä korkeampaa lämpöä, jopa noin 145 °C asti. Polymeeripinnoitteiden lämmönsietokykyyn vaikuttavat lämmönlähteen ominaisuudet, lämmön vaikutusaika pinnassa, lämpötilamuutosten nopeus sekä höyrypesu. [70, s. 21]

Ilman matalan ominaislämpökapasiteetin sekä johtumisesta ja säteilystä aiheutuvien hitaiden lämpötilamuutosten vuoksi kuiva lämpö ei normaalisti aiheuta ongelmia lattiapinnoitteille. Esimerkiksi uuniluukkujen läheisyydessä olevat pinnoitteet ovat poikkeustapauksia huomattavan korkean lämpötilan johdosta. Lattian pinnalla olevat nesteet välittävät lämpöä huomattavasti kuumaa ilmaa tai säteilyä tehokkaammin, mistä johtuen ne aiheuttavat suuremman pinnoitteen vaurioitumisriskin. Suurten lämpötilavaihteluiden ollessa todennäköisiä, esimerkiksi kylmävarastoissa tai tulipesien läheisyydessä, suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä nämä alueet potentiaalisesti ”elävät” suhteessa ympäröivään lattiapinta-alaan. Pinnoitteen altistuessa suoraan voimakkaalle lämpösäteilylle, kuten uuninluukkujen läheisyydessä, kannattaa harkita polymeeripinnoitteen sijaan paremmin lämpöä sietävää pinnoitetta, kuten esimerkiksi keraamisten laattojen valitsemista lattian pintamateriaaliksi. [70, s. 21-22]

Lämmön vaikutusaika lattian pinnalla riippuu pääasiassa kuumen nesteen viipymisestä lattian pinnassa. Nesteen viipyminen lattian pinnalla puolestaan riippuu lattian kokonaissuunnittelusta, erityisesti kaadoista viemäriin. Kaatojen ollessa vähintään 1,5 % viemäriä kohti, on epätodennäköistä, että kuumaa nestettä pääsee läikkymään niin pal-

jon, että pinnoitteen pehmenemislämpötila ylittyisi. Mikäli viemäröinti ei ole mahdollista, säännöllisesti kuumalle vedelle tai muulle nesteelle altistuvat lattiat tulisi suojata esimerkiksi asentamalla viilentävä ruiskujäähdytys valumakohtaan. [70, s. 22]

Lämpötilan muuttuessa nopeasti pinnoitteessa, eli lämpöshokin aikana, alustan ja pinnoitteen rajapintaan kohdistuu rasitus pinnoitemateriaalien erilaisesta lämpölaajenemisesta [70, s. 22] [73]. Nopea lämpötilan muutos saattaa aiheuttaa halkeilua ja pinnoitteen irtoamista alustasta [73]. Pinnoitteiden ollessa joustavia tai voimakkaasti täytettyjä, ne kestävät lämpöshokkeja paremmin [73]. Pinnoitekerroksen ollessa ohut tulee kiinnittää huomiota lämmön siirtymistä tartuntapintaan, joka voi vaikuttaa tartuntaan [70, s. 22]. Lämpötilan muuttuessa hitaasti vastaavaa ongelmaa ei yleensä esiinny [70, s. 22]. Pitkäaikainen altistuminen korkeille lämpötiloille saattaa aiheuttaa pinnoitteen jälkikiovettumista ja haurastumista [70, s. 22].

Höyrypesussa käytettävä korkean lämpötilan puhdistuslaitteiston epäasianmukainen käyttö saattaa pehmentää ja vaurioittaa lattiapinnoitetta. Höyrypesua suositellaan käytettäväksi tyypin 8 pinnoitteilla, joiden paksuus ylittää 9 mm. Ohuemmilla pinnoitteilla nykyaikaiset puhdistusaineet ja -laitteet ovat yleensä kustannustehokkaampia ratkaisuja. [70, s. 22]

### 5.2.1 Pinnoitetyypit

Kuten luvussa 5.2 mainittiin, betonin polymeeripinnoitetyyppejä ovat epoksi, polyuretaani, akryyli, sementtipolymeeriseos, vinyyliesteri tai polyurea. Muita tässä työssä käsiteltäviä pinnoiteryhmiä ovat pölynsidonta- ja imeytyskäsittelyt sekä elastiset pinnoitteet eli elastomeerit. Pinnoitteiden nimet perustuvat niiden hartsin eli sideaineeseen, joka on tärkein pinnoitteen ominaisuuksia määrittävä komponenteista [73].

Pintakyllästysaineiden käsittelyssä betonilattian pintaan ei muodostu kalvoa, eikä käsittely siis muuta betonin kitkaominaisuuksia. Käsittelyyn ei vaikuta betonin kosteus, tosin kosteassa betonissa pintakyllästysaineen tunkeutuminen betonin huokosiin heikkenee. Käsittely muuttaa betonin pinnassa normaalisti olevan pehmeän ja pölyävän kalsiumkarbonaatin kemiallisen reaktion kautta kovemmaksi ja pölyämättömäksi aineeksi, sekä sulkee betonin pinnan huokosia. [70, s. 25]

Betonilattian imeytysaineet ovat hyvin matalaviskoosisia liuote- tai vesiohenteisia polymeerilakkoja. Käsittely täyttää betonin pintaosan huokosia ja sitoo pölyä. Betonin pintaan imeytyskäsittelyssä muodostuu ohut ( $< 0,02$  mm) kalvo. [70, s. 25]

Epoksinpinnoitteet valmistetaan sekoittamalla epoksihartsia ja kovetetta. Epoksien ominaisuudet vaihtelevat suuresti hartsin ominaisuuksiin perustuen. Hartsi voi olla kiinteää tai nestemäistä, tosin betonin pinnoittamiseen käytetään useimmiten nestemäisiä. Epoksihartsilla on hyvä kemikaalikestävyys ja mekaaninen kestävyys. Epoksihartsien tärkein ominaisuus on niiden viskositeetti, jota voidaan tarvittaessa kontrolloida käyttämällä ohenteita ja liuotteita. [73]



Massapinnoitteina käytettäessä itsesiliävät epoksit kestävät kovaa hankaavaa mekaanista rasitusta. Pinnoitteiden kemiallinen kestävyys tulee tarkastella tapauskohtaisesti vaikeuttavan kemikaalin perusteella. Hierrettävät epoksinpinnoitteet kestävät hyvin erittäin suurta mekaanista rasitusta ja pintalakkaustyyppistä riippuen myös kemikaaleja. Mikäli pinnoitettavalla alueella on suuri lämpöshokkivaara, pinnoitteen paksuuden tulisi olla vähintään 6 mm kestävyysvarmistamiseksi. Epoksihartseja valmistetaan myös erikoispinnoitteina, kuten elastisina, sähköä johtavina ja hiottavina pinnoitteina. [70, s. 26]

Käytössä olevat yleisimmät epoksihartsityypit ovat bisfenoli A ja bisfenoli F [70, s. 25]. Bisfenoli A on perinteinen, suurimolekyylinen ja jäykkä epoksiharts [70, s. 25]. Bisfenoli F on uudempaa teknologiaa, pienimolekyylinen ja matalaviskoosinen [70, s. 25]. Näiden lisäksi on muitakin epoksihartsityyppejä, tärkeimpänä epoksi novolac, jonka erityinen ominaisuus on sen erittäin hyvä haponkestävyys myös rikkihappoa vastaan [73].

Epoksit voidaan myös jaotella liuotteen mukaan vesiohenteisiin, liuotinohenteisiin ja liuotteettomiin. Vesiohenteiset epoksit sallivat vesihöyryn läpäisevyyden esimerkiksi betonista pois ja näistä epokseista valmistetaan lakkoja, maaleja sekä itsesiliäviä ja hierrettäviä massoja. Liuotinohenteisiä epokseja käytetään yleensä lakkoina pohjustuksessa sekä hierrettävien epoksinpinnoitteiden pintalakkoina. Liuotteettomat epoksit tarttuvat betonialustaan hyvin ja kestävät pesuaineita, polttoaineita ja öljyjä. [70, s. 25]

Betonipintojen pinnoitteina käytettäviä polyuretaaneja on neljää perustyyppiä. Yksinkertaisimmat ovat 1-komponenttisia kosteuskovettuvia lakkoja ja maaleja. Toinen ryhmä koostuu 2-komponenttisista maaleista ja pinnoitteista, jotka kovettuvat isosyanaatin ja polyolin välisessä kemiallisessa reaktiossa. Kolmantena ryhmänä ovat 2-komponenttiset tuotteet, jotka kovettuvat kosteuden vaikutuksesta. Ja viimeisenä ovat yhdistelmäpolyuretaanit, joiden koostumus voi vaihdella. [70, s. 26]

Polyuretaanit muodostavat betonilattian pintaan kulutusta kestävän ja vesitiiviin pinnan, joka kestää hyvin monia erilaisia kemikaaleja. Polyuretaaneilla on hyvä elastisuus, iskunkestävyys ja silloituskyky, minkä ansiosta ne soveltuvat myös joustaville alustoille, kuten asfaltin tai vanerin päälle. Jotkin polyuretaanipinnoitteet ovat alttiita UV-säteilyn aiheuttamalle värisävyn muutokselle. [70, s. 26]

Akryylipinnoitteet ovat pääasiassa hierrettäviä massoja, joiden pinnoitepaksuus on yleensä 3 – 4 mm. Akryylipinnoitteet perustuvat akryylihartsiin, joka on liuotettu metyylietakrylaattimonomeeriin. Akryylihartsiin on mahdollista sekoittaa pigmenttiä ja käyttää tällöin ohuena pinnoitteena tai kiiviaineksella täytettynä itsesiliävänä massana. Akryylihartsin tartunta betonialustaan on erinomainen. Akryylipinnoitteen mekaanisen rasituksen kestävyys ja iskunkestävyys ovat hyvät, mutta kemiallisen kestävyysosan osalta tietyt aromaattiset ja klooratut liuottimet tuottavat ongelmia. Akryyli on nopeasti kovettuvaa ja sitä voidaan levittää myös alhaisissa lämpötiloissa. Akryylipinnoitteet vaativat riittävän ilmanvaihdon kovettuakseen. [70, s. 26-27]

Akryylipohjaisia pinnoitteita ovat vesiohenteiset lateksit, termoplastiset lakat sekä teollisuuden vaativat suojapinnoitteet, jotka ovat kertamuoveja. Akryylimuovien ryhmään kuuluvien pinnoitteiden ominaisuudet voivat vaihdella suuresti. [73]

Sementtipolymeeripinnoitteen sideaineena käytetään erikoisementin ja polymeerimuovien seosta. Yhdisteen etuna on sementtipohjaisten pinnoitteiden ja polymeeripinnoitteiden hyvien ominaisuuksien yhdistäminen. Sementtipolymeeripinnoitteilla on siis hyvät mekaaniset ominaisuudet, erittäin hyvä lämmönkesto, hyvä kemikaalienkesto, nopea kovettuminen, mahdollisuus levittää tuoreellekin betonille +5 °C lämpötilassa, vesihöyrynläpäisevyys sekä osmoottisen kuplimisen esto. Sementtipolymeerit voivat olla itsesiliäviä tai hierrettäviä. [70, s. 27]

Vinyyliesterit ovat epoksin ja metakryylihapon metakryyliestereitä [73]. Vinyyliesterihartsien viskositeetti on korkea [73]. Vinyyliestereiden kemiallinen kestävyys on erinomainen [70, s. 27] [73]. Vinyyliestereiden kutistumisjännitykset ovat korkeat, joten pinnoitus tehdään normaalisti useammasta kerroksesta [73]. Vinyyliesterit voivat olla 0,5 – 1,0 mm paksuja telattavia pinnoitteita, yli 5mm paksuisia hierrettäviä massapinnoitteita tai johtavia ESD pinnoitteita [70, s. 27].

Elastomeerit eli elastiset pinnoitteet ovat ristiinsidottuja polymeerejä, joiden erityinen ominaisuus on satojen prosenttien palautuva muodonmuutos. Betonilattiapinnoitteeksi soveltuvat elastomeerit ovat yleensä polyuretaanimassoja. [70, s. 27]

Polyureapinnoitteet ovat kaksikomponenttisia ruiskutettavia pinnoitteita, joiden ominaisuudet perustuvat isosyanaatin ja polyamiinin väliseen reaktioon. Polyureapinnoitteet kovettuvat erittäin nopeasti ja niillä on erittäin hyvät kemikaali- ja lämmönkesto. [70, s. 27]

## 5.2.2 Pinnoitteen valinta

Pinnoitetyyppiä valitessa kemikaalirasituksen näkökulmasta täytyy aina huomioida, mikä kemikaali rasittaa, tai voi mahdollisesti rasittaa betonia. Kaikki pinnoitteet eivät automaattisesti kestä kaikenlaisia kemiallisia rasituksia ja joitain rasituksia ei välttämättä yksikään pinnoite kestä. Pinnoitteita voidaan myös käyttää eri tuotteiden yhdistelminä [70, s. 16]. Kemikaalirasituksia voidaan luokitella vaikuttavan kemikaalin väkevyyden, vaikutusajan sekä lämpötilan perusteella [70, s. 12]. Taulukossa 20 esitellään betonilattian pinnoitetyyppien ominaisuuksia yleisellä tasolla.

**Taulukko 20.** Betonilattiapinnoitteiden ominaisuuksia. [70, s. 18]

<b>A</b> <b>Pölynsidonta-</b> <b>aineet</b>	Fluatointi	Ei muodosta kalvoa. Soveltuu käytettäväksi alhaisissakin lämpötiloissa. Vesihöyryä läpäisevä.
	Imeytyvät tuotteet	Sitovat pölyn.
<b>B</b> <b>Ohennettavat</b> <b>maalit ja la-</b> <b>kat</b>	Vesiohenteiset epoksit	Läpäisevät vesihöyryä.
	Liuotinohenteiset epoksit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pintalujuutta.
	Kosteuskovettuvat polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pintalujuutta.
<b>C</b> <b>Liutteetto-</b> <b>mat lakat,</b> <b>maalit ja pin-</b> <b>noitteet</b>	Epoksit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys.
	Polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisten rasitusten kestävyys. Soveltuvat myös asfaltti- ja vanerialustoille. Helposti puhdistettava.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.
<b>D</b> <b>Itsetiivistävät</b> <b>massapinnoit-</b> <b>teet</b>	Epoksimassat	Hyvä mekaanisen ja kohtuullinen kemiallisen rasituksen kestävyys. Helposti puhdistettavissa.
	Polyuretaanit	Hyvä mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys. Kestävät iskuja. Hyvä halkeaman silloituskyky. Toimivat myös vedeneristeenä. Helposti puhdistettavissa.
	Akryylit	Hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Nopeasti reagoivia. Voimakas haju työn aikana. Vesi-tiiviitä.
	Sementti-polymeerimassat	Hyvä mekaanisen rasituksen ja erinomainen lämmön kestävyys. Nopeasti kovettuvia. Vesi-tiiviitä.
<b>E</b> <b>Hierrettävät</b> <b>massapinnoit-</b> <b>teet</b>	Epoksit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Kestävät lämpöshokkeja.
	Akryylit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Toimivat vedeneristeenä. Nopeasti reagoivia. Voidaan työstää myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyuretaanit	Erittäin hyvä mekaanisen ja hyvä kemiallisen rasituksen kestävyys. Hyvä iskunkestävyys. Toimivat vedeneristeenä.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys
<b>F</b> <b>Erikoispin-</b> <b>noitteet</b>	Sähköä johtavat pinnoitteet	Pinnoitemassa maadoitettavissa.
	Elastiset pinnoitteet (elastomeerit)	Erittäin hyvä halkeamien silloituskyky myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyurea	Ruiskutettavia, nopeasti kovettuvia. Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.

Lattiapinnoitteen valintaan vaikuttavat suunniteltavan kohteen ominaisuudet ja vaatimukset kokonaisuutena. Julkaisussa by 54 / BLY 12 Betonilattioiden pinnoitusohjeet 2010 [70, s. 11,15] on lueteltu seuraavia asioita, joihin tulee kiinnittää huomiota pinnoitetyyppejä valitessa:

- tilassa tapahtuvan liikenteen kuormitus ja määrä
- staattinen vai dynaaminen kuormitustyyppi sekä potentiaalisten kolhujen voimakkuus
- tuotantolaitoksessa käsiteltävien ja käytettävien kemikaalien (mukaan lukien puhdistusaineet) kaikki tiedot, jotka vaikuttavat rasituksen suuruuteen kuten kontaktin mahdollinen laajuus, liuoksen väkevyys sekä lämpötila
- betonirakenteen ympäristön lämpötila käytössä sekä seisakissa (pesu/puhdistus)
- värisävy ja muut esteettiset tekijät
- lattian altistuminen auringonvalolle tai UV-säteilylle
- lattian puhdistettavuus sekä hygieni- ja elintarviketeollisuuden vaatimusten mukaisuus
- erityisvaatimukset, kuten liukastumisen esto tai antistaattisuus
- käyttöikä
- lattian ja pinnoitteen paksuus
- pinnoitteen asettumiseen ja kovettumiseen käytettävissä oleva aika
- alustan ikä, tekniset tiedot ja muut tiedossa olevat ominaisuudet, jotka voivat vaikuttaa pinnoitteen tartuntaan tai vaadittavaan esikäsitelyyn
- käyttöturvallisuuteen ja ympäristöön liittyvät vaatimukset
- kustannukset.

Pinnoitteilla ja pintakäsittely-yhdistelmillä on standardien mukaiset tunnuksot, jotka voidaan merkitä piirustuksiin ja työselityksiin. Esimerkkinä standardeilla PSK 2703 [76] ja SFS-EN 14879-3 [77] on omat merkintätapansa yksilöimään muun muassa pinnoitteen sideainetyypin, pinnoitteen paksuuden sekä alustan esikäsitelyn.

### 5.2.3 Pinnoitettavan alustan ominaisuudet

Pinnoitettava betonirakenne ja pinnoite muodostavat kokonaisuuden, jonka toiminnan varmistamiseksi myös pinnoitettavalta alustalta vaaditaan tiettyjä ominaisuuksia [70, s. 29]. Mikäli alusta ei ole soveltuva pinnoitukselle, ei voida välttämättä varmistua pinnoitteen oikeanlaisesta toiminnasta. Tällöin myös pinnoitemateriaalin kemikaaleilta suojaava vaikutus saattaa häiriintyä, joten on hyvä määrittää toimenpiteitä pinnoitettavan betonipinnan esikäsitelystä ja puhtaudesta. Ennen betonin pinnoittamista on syytä arvioida pinnan puhtaus, kosteus, lujuus sekä sileys [73]. Lisäksi betonipinta on syytä esikäsitellä tarvittavalla tavalla [73].

Betonirakenteen kosteuspitoisuus tulee mitata ennen pinnoittamista, jotta voidaan varmistaa oikea pinnoitusajankohta vaikuttavan kosteusrajoituksen mukaisesti, sekä varmistaa että betonin kutistuminen pinnoittamisen jälkeen ei ole haitallisen suurta [73] [70, s. 29]. Betoni kuivuu pinnoistaan, joten syvemmälle mentäessä betonin suhteellinen

kosteuspitoisuus kasvaa [70, s. 29]. Betonin kosteudenmittaus tehdään siihen tarkoitukseen valmistetulla laitteistolla, jonka perusteella pystytään arvioimaan pinnoitusalueen kosteuspitoisuuden nousua pinnoittamisen vaikutuksesta [70, s. 29]. Betonin kriittisellä kosteusarvolla tarkoitetaan arvoa, jonka tulee alittaa mittaustarkkuus huomioiden ennen pinnoittamista [70, s. 30]. Betonin sallittu kosteuspitoisuus on pinnoitteesta riippuva ominaisuus [70, s. 30] [73]. Myös betonirakenteen muulta reunalta tapahtuva veden nouseminen tai imeytyminen betonirakenteeseen on huomioitava, mikäli sitä voidaan olettaa tapahtuvan [70, s. 30-31].

Pinnoitettavalla betonirakenteella tulee olla riittävä lujuus ja kulutuskestävyys tilan käyttötarkoituksen mukaisesti [70, s. 33]. Betonisen lattian lujuus ilmoitetaan betonin kuutiolujuusluokkaa vastaavana numeroarvona (30, 40, 50, 60) [70, s. 33]. Suositeltava luokka on 30, sillä korkeampien lujuuksien betoneissa saattaa esiintyä ongelmia pinnoitteen tartunnassa [70, s. 33]. Pinnoitteet vaativat betonipinnalta pinnoitetyypistä ja vaikuttavasta rasituksesta riippuen  $0,2 - 2,0 \text{ N/mm}^2$  vetolujuuden [71, s. 37]. Betonilattian kulutuskestävyys määritetään pyörärasituskokeella ja lattian suurin sallittu kuluminen määritellään tapauskohtaisella raja-arvolla [71, s. 39].

Betonipinnalta vaaditaan riittävää tasaisuutta, sillä polymeeripinnoitteet noudattelevat alustan muotoja. Olemassa olevia betonilattioita voidaan joutua tasoittamaan, joka aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Lisäksi tietyt karkeapintaiset polymeeripinnoitteet eivät johda nesteitä pois pinnalta ilman riittäviä kaatoja. Vähimmäiskaato tulisi olla 1:80 sileällä pinnalla, mutta karkeat pinnat vaativat suurempaa kaatoa. Yli 1:60 kaato saattaa johtaa pinnoitteen valumiseen itsesiliävillä tuotteilla. [70, s. 33-34]

Betonilattioihin tulevien saumojen kohdalla pinnoitteeseen tulee myös sauma. Tästä syystä johtuen saumojen lukumäärä tulee optimoida niiden tarpeen ja niiden aiheuttamien haittojen näkökulmat huomioiden. [70, s. 34]

Betonipinnan sileys tarkoittaa pinnan pienimittakaavaista rakennetta, eikä esimerkiksi aaltoilua tai kaltevuusvirheitä. Pinnan sileys todetaan silmämääräisesti sekä tunnustelemalla käsillä. Maaleille, lakoille ja pölynsidontakäsittelylle suositellaan sileää alustaa (esikäsittelynä esimerkiksi pintahionta). Massapinnoitteille suositellaan karkeapintaista alustaa tartunnan parantamiseksi (esikäsittelynä esimerkiksi sinkopuhdistus ja jyrsintä). Lisäksi betonipinnan puhtaudesta tulee huolehtia sekä varmistaa ettei betonin pinnassa ole heikkouksia kuten hydratoitumattomasta sementistä aiheutuvaa heikkoa kerrosta. [70, s. 35-36]

Pinnoitettava alusta voidaan esikäsitellä ennen pinnoittamista. Esikäsitelyn tarkoituksena on poistaa epäpuhtaudet kuten sementtiliima ja heikko pintabetoni, jotta pinnoitteen tartunta paranee [73]. Betonipinnan pinnoitusta edeltäviä esikäsitelymenetelmiä on lueteltu taulukossa 21.

**Taulukko 21.** Betonipinnan esikäsitelymenetelmiä. [70, s. 36-38] [71, s. 174-177]

<b>Esikäsitelymenetelmä</b>	<b>Menetelmän kuvaus</b>
Happopeittaus	Suolahappoa laimennetaan vedellä ja liuos kaadetaan lattialle. Vaikutusaika noin 10 min, jonka jälkeen huuhdotaan runsaalla vedellä pois. Liuottaa sementtiliimakerrosta betonin pinnasta pois.
Hionta	Lattiasta poistetaan hieno sementtiliima ja muuten lujuu­del­taan heikot ainesosat, paljastaen hienon kiviaineksen alta. Voidaan myös hioa syvemmältä, saaden karkean kiviaineksen näkyviin.
Sinkopuhdistus	Puhdistettavaan alustaan singotaan metallihauleja, jotka irrottavat heikkolaatuisen aineksen. Taloudellinen tapa puhdistaa pintakerros vaurioittamatta betonirakennetta muuten.
Jyrsintä	Jyrsintälaitteen terät iskeytyvät betoniin ja murtavat sitä, muodostaen karkean pinnan. Pinnasta tulee tasainen lujuus­vaihteluista tai epäpuhtauksista riippumatta.
Vesisuihkupuhdistus	Korkeapaineisella vesisuihkulla puhdistetaan betonipinta ja poistetaan heikkolaatuiset ainekset. Veden paine irrottaa be­tonia tunkeutumalla huokosiin ja kiviainesrakenteiden taakse.
Hiekkapuhallus	Sinkopuhdistuksen tyyppisesti puhdistettavaan alustaan kohdistetaan puhallushiekkaa irrottamaan heikkolaatuista betonia ja epäpuhtauksia.
Liekkiharjaus	Puhdistettavaan pintaan kohdistetaan voimakas nestekaasu- tai asetyleeniliekki, joka höyrystää betonin huokosissa olevan nesteen ja irrottaa betonin pintaa.

Esikäsitelymenetelmät sopivat erilaisille epäpuhtauksille ja pinnoitteilla itsessään voi olla omia esikäsitelyvaatimuksiaan. Mikäli alusta tai vanha pinnoite on vaurioitunut kemikaalin tai muun epäpuhtauden vaikutuksesta, on kemikaaliryhmittäin suositeltuja tapoja valmistella alusta uutta pinnoitusta varten. Taulukossa 22 esitellään menetelmiä epäpuhtauksien poistamiseksi betonipinnalta ennen pinnoittamista.

**Taulukko 22.** Menetelmät epäpuhtauksien poistamiseksi pinnoitettavalta alustalta. [73]

<b>Epäpuhtaus</b>	<b>Puhdistusmenetelmä</b>
Sementtiliima, kalkkisaostumat	Sinkopuhdistus, jyrsintä, hionta, vesisuihkupuhdistus, happopeittaus
Öljy, rasva, elintarviketeollisuuden tuotteet	Emulsiopesu, liekkipuhdistus
Aikaisemmat pinnoitteet, jälkikäsitelyaineet, tiivistysaineet	Sinkopuhdistus, jyrsintä, hionta, vesisuihkupuhallus, piikkaus, liuotepuhdistus
Hapot ja emäkset	Neutralointi, vesihuuhtelu
Suolat	Vesipesu

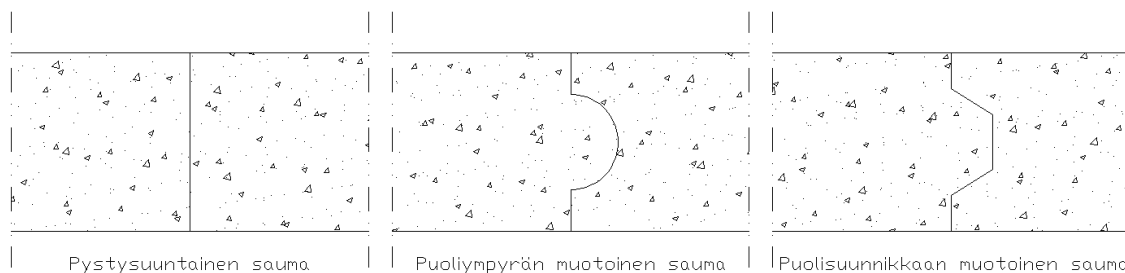
### 5.3 Betonin saumakohtien kemikaalikestävyys

Saumoja käytetään betonilattioiden ja muiden suuren pinta-alan omaavien betonirakenteiden yhteydessä niiden ominaisuuksien varmistamiseksi. Saumoja on neljän tyyppisiä: kutistumissaumat kuivumiskutistumisen aiheuttamien vetojännitysten ja halkeilun pienentämiseksi, työsaumat rajaamaan yhdellä kertaa valettavaa osuutta, irrotussaumat pakkovoimien esiintymisen estämiseksi ja rakenteelliset liikuntasaumot laatan pituudenmuutosten mahdollistamiseksi [71, s. 77]. Saumat ovat yleensä rakenteiden heikoimpia kohtia, joten niiden sijoittelu, tyyppi ja toteutus tulee suunnitella huolellisesti.

Saumojen käyttö on välttämätöntä suurissa betonikohteissa [78], joiden valaminen jatkuvalla valulla ei ole mahdollista tai teknillisesti kannattavaa. Saumojen reunat vaurioituvat herkästi kovan mekaanisen rasituksen alaisena, kuten teollisuuskohteissa ajavien trukkien vaikutuksesta [71, s. 77]. Saumojen vaurioituminen tekee betonin alttiimmaksi kemiallisille rasituksille halkeamia vastaavalla tavalla. Suurien betonirakenteiden yhteydessä teollisuusrakentamisessa käytetään usein pinnoitteita. Pinnoitettaessa alusrakenteen saumakohtia, pinnoitteeseen tehdään aina sauma, eikä sitä jatketa betonirakenteen toiminnallisen saumakohdan ylitse [70, s. 34].

Saumat ovat toiminnallinen osa lattiaa ja niiden suunnittelu sekä toteutus vaativat huolellisuutta, sillä saumat ovat lähes poikkeuksetta betonilattian heikoin kohta. Saumat voidaan tehdä joko sahaamalla kovettuneeseen betoniin ura tai, betonilattiaa valettaessa voidaan käyttää erilaisia muotteja tai esivalmistettuja saumausrakenteita. Saumaustapa riippuu saumatyypistä. Kutistumissaumat ovat yleensä sahasaumojen, kun taas liikunta- ja työsaumat toteutetaan useimmiten esivalmistetuilla saumarakenteilla. Esivalmistetuilla saumarakenteilla on erityisen tärkeää asentaa ne oikeaan korkoon ja huolehtia niiden tuennasta, jotta ne pysyvät paikallaan koko valun ajan. [71, s. 178]

Saumojen tiiviysominaisuudet ovat saumatonta betonilattiaa huonommat ja saumakohdat ovat riskitekijä betonirakenteen tiiviydelle [78], mutta niiden käyttö on kuitenkin erityisesti laaja-alaisissa teollisuusrakennuksissa välttämätöntä. Sauman muodolla poikkileikkauksessa on merkitystä sauman tiiviyteen ja sauman hydraulisen paineen kesto-kykyyn [78]. Betonilattian poikkileikkauksessa suora pystysuuntainen sauma on huonoin vaihtoehto sauman muodolle, mikäli pyritään nestetiiviiseen saumaan [78]. Sauman muodoiksi suositellaan puolisuunnikkaista, jonka jälkeen puoliliemipyrän muotoinen sauma on paras vaihtoehto [78]. Saumojen muotoja havainnollistetaan kuvassa 14.



**Kuva 14.** Betonilattian saumojen muotovaihtoehdot. Puolisuunnikkaan muotoinen sauma on suositeltava vaihtoehto tiiviyyden näkökulmasta.

Betonielementtirakenteiden saumapinta tulee olla hyvin tiivistetty ja yhtenäinen, jotta sauman tiiviys saadaan varmistettua. Sauman tulee olla koko matkaltaan tasalevyinen, jotta pohjatäytenauha saadaan asennettua tukevasti. Betonielementtien välisten saumojen koko valitaan kestäämään elementin lämpö- ja kosteusliikkeitä ja siten se riippuu elementtien pituudesta saumakohdan molemmilla puolilla. Saumausmassalla saumattavien julkisivuelementtien suunnitteluleveydet on listattu taulukossa 23. [4, s. 25]

**Taulukko 23.** Saumausmassalla saumattavan julkisivun saumojen suunnitteluleveydet. [4, s. 25]

Elementin sivun pituus [mm]	Sauman suunnitteluleveys [mm]
< 5500	15
5500...7000	20
7000...9000	25
> 9000	30

Saumojen kemikaalinkeston varmistamiseksi teollisuusrakentamisen kohteissa saumassa tulee usein käyttää tiivistäviä saumanauhoja, kuten bentoniittinauhoja, jotka on suunniteltu vesitiiviiksi sekä vaikuttavaa kemikaalia kestäviksi. Saumanauhan valinnassa tulee kiinnittää huomiota rasitustyyppiin ja tämän jälkeen tutustua valmistajan ilmoittamiin tuotetietoihin. Saumanauhat tulee valita rasittavaa kemikaalia kestäväksi ja toteuttaa tiiviiksi, valmistajan ohjeistuksen mukaisesti missä mahdollista. Valmistajat usein ilmoittavat saumanauhojensa materiaalit ja niiden kestävyysominaisuudet. Teollisuuslaitosten betonilattioiden saumakohdat tulee suunnitella kestäämään kemikaalia lattian betonia tai betonin pinnoitetta vastaavasti.

## 5.4 Uhrautuva betonikerros

Uhrautuva betonikerros suojaa varsinaista betonirakennetta uhrautumalla eli vaurioitumalla itse vahingon, kuten kemikaalivuodon tapahtuessa. Uhrautuvalla betonikerroksella ei ole mitään muuta tarkoitusta, kuin suojata pääasiallista rakennetta vaurioitumisteissa [79]. Uhrautuva betonikerros eristää varsinaisen kantavan rakenteen vaurioitumisen toimimalla suojaavana kerroksena [79]. Uhrautuva betoni on suunniteltu uusittavaksi eikä sen käyttöikä välttämättä vastaa betonirakenteen käyttöikää. Uusinta voi tapahtua vahingon seurauksena, käyttötarkoituksen muuttuessa tai pinnoitteen käyttöikänsä päätty-



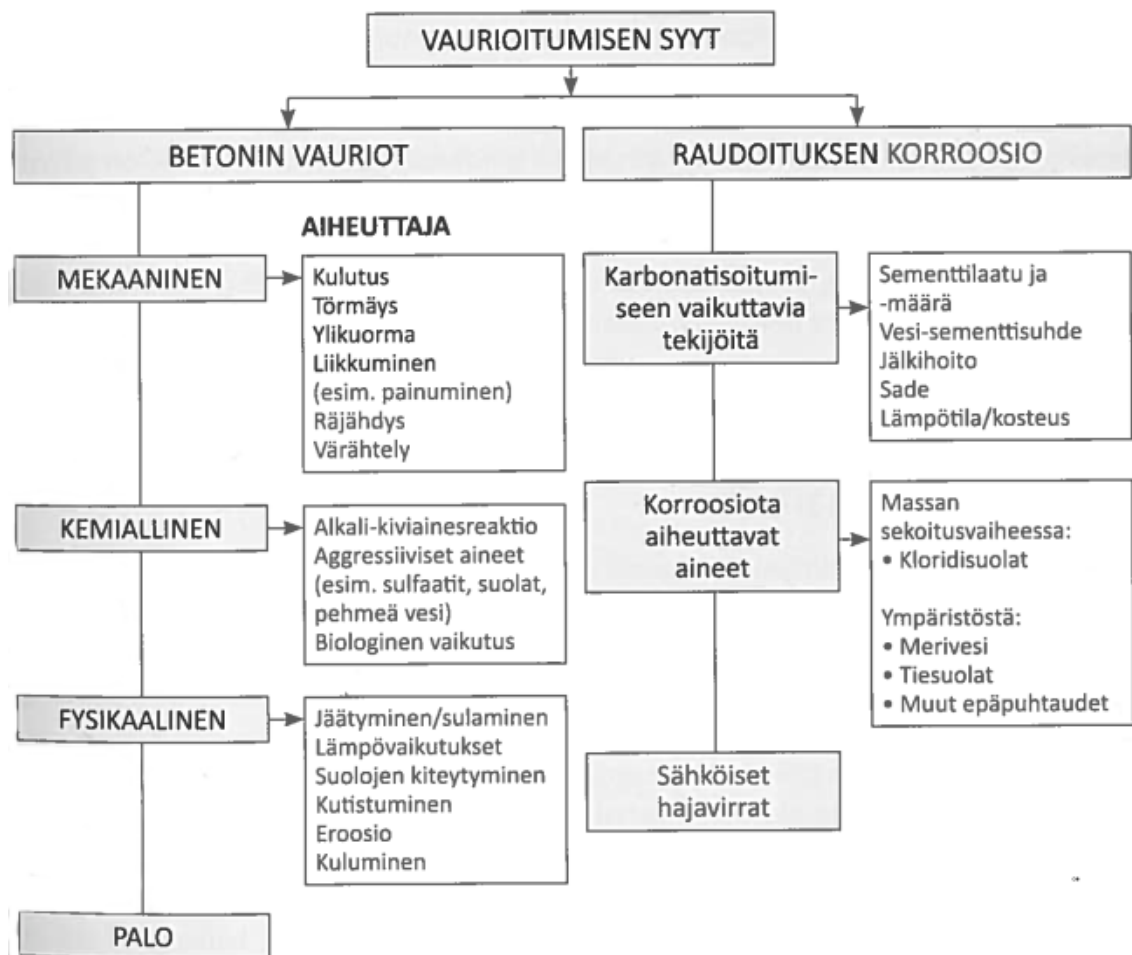
tyä. Uhrautuvalle betonikerrokselle on järkevää määrittää tavallisesta betonista poikkeava koostumus [79].

Uhrautuvaa betonikerrosta voidaan käyttää esimerkiksi ydinvoimaloissa korkeissa lämpötiloissa lähellä ydinreaktoria [79]. Reaktorin sulaessa uhrautuva betonikerros sulaa, joka auttaa reaktorin jäähtymisessä ja estää kantavien rakenteiden sulamisen korkean lämpötilan vaikutuksesta [79]. Vastaavaa mekanismia voitaneen soveltaa teollisuusrakentamisen betonirakenteiden suojaamiseen kemikaaleilta, mikäli suunnitellaan kohdetta, jossa voimakkaan kemikaalin vuoto on mahdollinen tai jopa todennäköinen, eikä pinnoittamisella saada hyväksyttävää suojausta.

Lisäksi on aineita, joiden tarkoituksena on estää betonipinnan likaantumista. Tällaisia ovat esimerkiksi impregnointiaineet, jotka estävät veden kapillaarisen kulkeutumisen pintakerroksen läpi, tehden betonin pinnasta vettä hylkivän, ilman pintaan muodostuvaa kalvoa. Likaantumisen eston tarkoituksena on useimmiten betonin suojaaminen erilaisilta töherryksiltä, estäen maalien ja tussien imeytymisen syvälle betoniin, jolloin puhdistus voidaan tehdä betonin pinnasta. Töherrystenestoaineiden käyttöikä ei ole kovin pitkä. [8, s. 407]

## 6. BETONIN KÄYTTÖIKÄSUUNNITTELU

Betonin käyttöikäsuunnittelulla tarkoitetaan rakenteiden kestävyys suunnittelua säilyvyystekijöiden näkökulmasta [5, s. 8]. Betonin käyttöikäsuunnittelua on vaadittu Suomessa vuodesta 2005 alkaen [8, s. 136]. Käyttöikäsuunnittelua varten tarvitaan tiedot betonirakenteen ympäristöolosuhteista sekä betonirakenteen suunniteltu käyttöikä [5, s. 8]. Betonin käyttöikäsuunnittelu edellyttää betonin vauriomekanismien ja niiden aikariippuvuuksien tuntemista [5, s. 8]. Betonin vaurioitumisilmiöt jaetaan mekaanisiin, fysikaalisiin ja kemiallisiin ilmiöihin [8, s. 100]. Betonirakenteen vaurioitumisilmiöitä esitetään kuvassa 15.

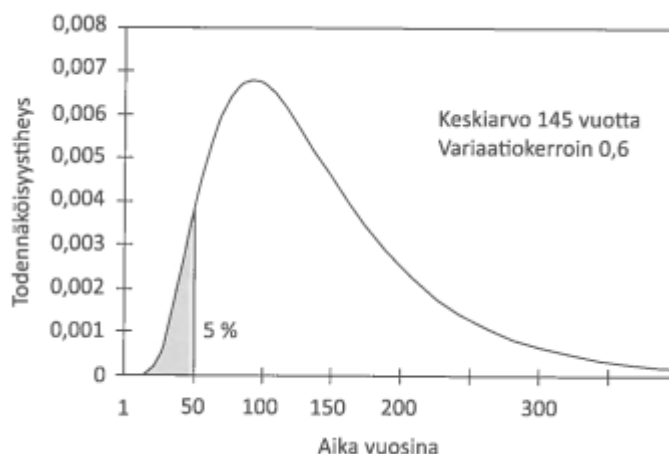


**Kuva 15.** Betonirakenteen vaurioituminen voi johtua monesta eri syystä, jotka voivat vaikuttaa yhtä aikaa ja myös toisiinsa. [8, s. 101]

Betonin suunniteltu käyttöikä tarkoittaa rakennukselle tai rakennuksen osalle suunniteltua käyttöiän vaatimusta, jonka rakenne kestää vaurioitumatta vaadittavalla tasolla, edellyttäen sen asianmukaista huoltoa 95 % todennäköisyydellä [5, s. 8]. Tämän tavoit-

tekäyttöiän vaatimuksen valitsee tilaaja [5, s. 8]. Tavoiteikäyttöiän perusteella rakenne-suunnittelija valitsee rakennukselle (sekä mahdollisesti yksittäisille rakennusosille) suunnittelukäyttöiän [5, s. 8,32]. Suunnittelukäyttöiän lisäksi suunnittelija määrittelee kaikille betonirakenteille ympäristörasituksiin perustuvat rasitusluokat, joiden perusteella ne suunnitellaan [5, s. 8].

Betonin käyttöikä perustuu logaritmiseen todennäköisyysjakaumaan, jossa suunnittelukäyttöikä saavutetaan 95 %:n todennäköisyydellä [8, s. 99]. Käyttöiän ollessa 50 vuotta, tilastollisesti 5 % rakenteista saattaa vaurioitua ennen 50 vuotta, puolet kestää lähes 150 vuotta ja pitkäikäisimmät satoja vuosia [5, s. 8]. Käytännössä rakenne kestä suunnittelukäyttöiän ilman korjaustarvetta, kunhan rakennetta huolletaan säännöllisesti [8, s. 99]. Suunnittelukäyttöiän ylityttyä rakenteen käyttöikää voidaan pidentää korjaustoimenpiteillä [8, s. 99]. Kuva 16 havainnollistaa betonin käyttöikää esimerkillä betonirakenteen käyttöiän todennäköisyysjakaumasta 50 vuoden suunnitellulle käyttöiälle.



**Kuva 16.** Esimerkki betonin suunnitellun käyttöiän todennäköisyysjakaumasta 50 vuoden suunnittelukäyttöiälle. [5, s. 8]

Mikäli käytetään pidempää käyttöikää kuin 50 vuotta, esimerkiksi 100 vuotta, betonirakenteen vaurioitumisen todennäköisyyttä voidaan pienentää. Mahdolliset suositellut käyttöiät betonirakenteille ovat 50, 100, 200 ja erityistapauksissa 25 vuotta. Periaatteena on mitä vaikeampaa ja kalliimpaa rakenteen korjaaminen on, sitä pidempi sen laskennallinen käyttöikä tulisi olla. Esimerkiksi yleensä perustuksia ja kantavaa runkoa ei päästä vaihtamaan niiden käyttöiän tultua päätökseen. Suuntaa-antavia suosituksia erityyppisten rakennusten ja rakennusosien suunnittelukäyttöiän valintaan on annettu taulukossa 24. [5, s. 9,32]

**Taulukko 24.** Suuntaa-antavia suosituksia rakennusten ja rakennusosien käyttöiän valintaan. Ylempänä oleva arvo on ensisijainen suositus. [5, s. 32]

	<b>Normaali asuin- tai toimisto- rakennus</b>	<b>Asuin- tai toimistora- kennus, 100v</b>	<b>Julkinen, erikoisra- kennus<sup>1)</sup></b>	<b>Halli- tai te- ollisuusra- kennus</b>	<b>Pysäköin- titalo</b>
<b>Rakennus</b>	<b>50 v</b>	<b>100 v</b>	<b>200 v</b>	<b>50 v</b>	<b>50 v</b>
Perustukset	100 v	100 v 200 v	200 v	100 v	100 v
Kantavat sisä- rakenteet <sup>2)</sup>	100 v 200 v	100 v 200 v	200 v	50 v 100 v	50 v 100 v
Kantavat ul- korakenteet	50 v 100 v	100 v	200 v 100 v	50 v	50 v 100 v
Ei-kantavat ulkorakenteet	50 v	100 v	200 v <sup>3)</sup> 100 v	50 v	50 v 100 v
Vaakaraken- teiden pinta- kerrokset					25 v <sup>4)</sup> 50 v

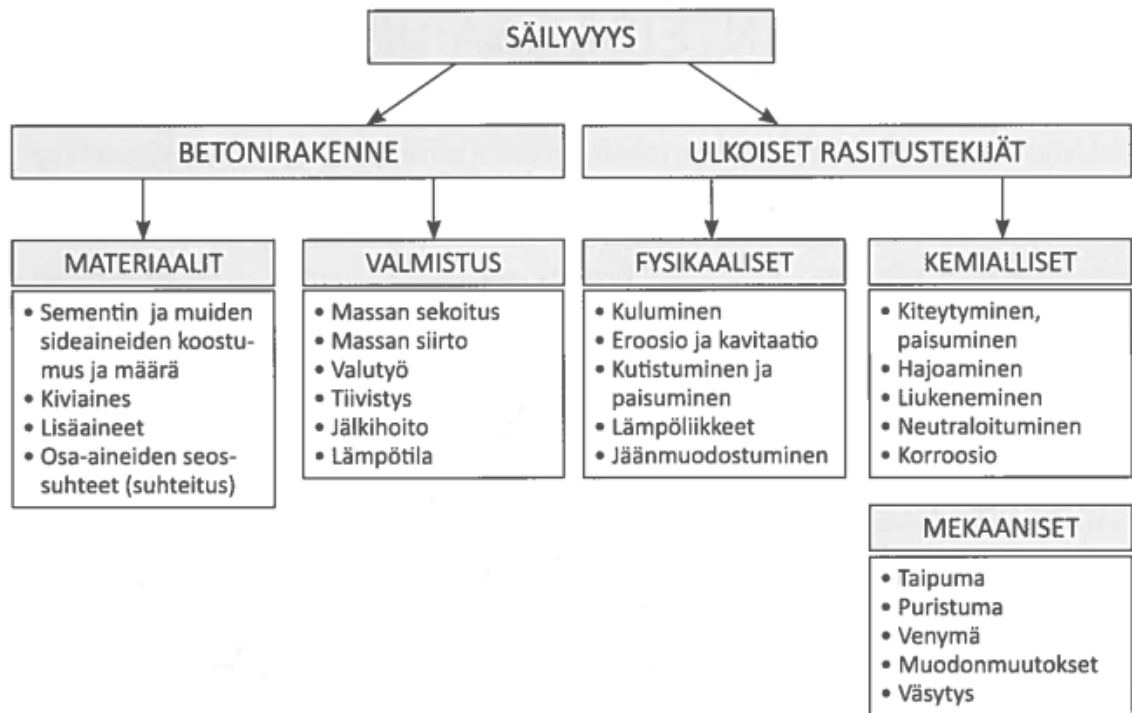
<sup>1)</sup> Esimerkiksi museo tai jokin muu merkittävä julkinen rakennus.

<sup>2)</sup> Sisärakenteissa betonilla ei ole vauriomekanismeja, siten käyttöikä voi olla 50...200 vuotta.

<sup>3)</sup> Julkisivuissa 200 vuoden käyttöikää rajoittaa myös liittyvien rakenteiden (esim. eristeiden) käyttöiät. Siten rakenteet tulisi tehdä vaihdettaviksi.

<sup>4)</sup> Kulutukselle alttiina olevien pysäköintitasojen yläpintojen käyttöikä on rajallinen, ellei kulutuskestävyyttä paranneta esimerkiksi pintasirotteella tai kovabetonikerroksella.

Betonin koostumusta valittaessa kemiallisesti rasitetulle betonirakenteelle, on määritettävä betoniin vaikuttavat rasitusluokitukset kemikaalirasituksen lisäksi. Nämä saattavat asettaa omia vaatimuksiaan esimerkiksi vesi-sementtisuhteelle tai sementin koostumukselle. Betonin koostumuksella, betonirakenteen valmistustekniikalla sekä ympäristön olosuhteilla on merkittävä vaikutus betonirakenteen lujuuden, muodon ja laadun säilymiseen koko suunnitellun käyttöiän ajan [8, s. 100]. Kuvassa 17 esitetään betonirakenteen säilyvyyteen vaikuttavia betonirakenteen omia ja ulkoisia tekijöitä.



**Kuva 17.** Betonirakenteen säilyvyyteen vaikuttavat sekä betonin materiaalitekniset ominaisuudet ja valmistustekniikka että rakenteeseen kohdistuvat ulkoiset rasitustekijät. [8, s. 100]

Betonirakenteille on määritelty ympäristörasitusten mukaiset rasitusluokat standardissa SFS-EN 206. Rasitusluokitus perustuu betonirakenteen ympäristön aiheuttamiin luonnollisiin rasituksiin, kuten karbonatisoitumisen aiheuttamiin rasituksiin. Rasitusluokat määrittelevät muun muassa käytettävän betonin pienintä sallittua lujuusluokkaa, raudoituksen pienimpiä sallittuja peitepaksuuksia, kiviainestyyppiä, sementin sideaineen vaatimuksia sekä suurinta sallittua vesi-sementtisuhdetta [25]. Taulukossa 25 on esitetty standardin SFS-EN 206 mukaiset betonirakenteiden ympäristörasitusten rasitusluokat.

**Taulukko 25.** Betonirakenteiden rasitusluokat. [25]

Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokka voi esiintyä
<b>1 Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä</b>		
X0	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni: Kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta niitä, joissa esiintyy jäädytys-sulatus- tai kulutusrasitusta tai kemiallista rasitusta.  Raudoitettu tai metallia sisältävä betoni: Hyvin kuiva	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on hyvin alhainen
<b>2 Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio</b>		
Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on alttiina ilmalle ja kosteudelle, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XC1	Kuiva tai jatkuvasti märkä	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen Pysyvästi vedenalainen betoni
XC2	Kostea, harvoin kuiva	Betonipinnat, jotka ovat pitkään kosketuksissa veden kanssa Usein perustukset
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on kohtalainen tai suuri Ulkona oleva sateelta suojattu betoni
XC4	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	Betonipinnat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät kuulu rasitusluokkaan XC2
<b>3 Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit muualta kuin merivedestä</b>		
Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on kosketuksissa veden kanssa, joka sisältää muista lähteistä kuin merivedestä peräisin olevia klorideja (kloridilähde voi olla myös jäänpoistoaine), rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman sisältämille klorideille
XD2	Kostea, harvoin kuiva	Uima-altaat Betoni on alttiina kloridipitoisille teollisuusvesille
XD3	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	Sillan osat, jotka ovat alttiina kloridipitoisille roiskeille Jalkakäytävät. Paikoitustalojen laatat
<b>4 Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit merivedestä</b>		
Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on alttiina klorideille, jotka ovat peräisin merivedestä tai ilman kuljettamasta merivedestä peräisin olevasta suolasta, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XS1	Kosketuksissa ilman kuljettaman suolan kanssa, mutta ei suorassa kosketuksessa meriveteen	Lähellä rannikkoa tai rannikolla olevat rakenteet
XS2	Pystyvästi meriveden alla	Merirakenteiden osat

XS3	Meriveden vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä	Merirakenteiden osat
<b>5 Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineille tai ilman niitä</b>		
Jos betoni on märkä ja siihen kohdistuu kosteuden lisäksi merkittäviä jäädytys-sulatusrasituksia, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästymisen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästymisen ja jäänsulatusaineet	Tierakenteiden pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille
XF3	Suuri vedellä kyllästymisen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat
XF4	Suuri vedellä kyllästymisen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Jäänsulatusaineille alttiit tiet ja siltojen kannet Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit betonipinnat Roiskevyöhykkeellä olevat jäätymiselle alttiit merirakenteet
<b>6 Kemiallinen rasitus</b>		
Jos betoniin kohdistuu luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus, rasitus luokitellaan seuraavasti:		
XA1	Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuva luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 27 mukaisesti
XA2	Kemiallisesti kohtalaisesti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuva luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 27 mukaisesti
XA3	Kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen ympäristö	Betoniin kohdistuva luonnon maaperästä ja pohjavedestä aiheutuva kemiallinen rasitus taulukon 27 mukaisesti

Tämä rasitusluokittelu ei estä betonin käyttöpaikalla vallitsevien erityisolosuhteiden huomioimista betonirakenteiden suunnittelussa [25]. Teollisuudessa esiintyvät kemikaalit eivät suoranaisesti kuulu rasitustaulukon mukaisiin maaperän tai pohjaveden aiheuttamiin XA-rasitusluokkiin, vaan asiaa tulee tutkia kemikaalikohtaisesti. Luvussa 6.1 käsitellään betonin käyttöikäsuunnittelua XA-rasitusluokkiin kuulumattomien kemiallisten rasitusten vaikuttaessa.

Rasitusluokittain ja rasitusluokkayhdistelmittäin suunnittelijan on valittava asioita, kuten betonin lujuusluokka ja raudoituksen suojabetonikerroksen paksuus [5, s. 9]. Taulukossa 26 on esitetty suunnittelijan ja betonin valmistajan määrittelemät asiat rasitusluokittain.

**Taulukko 26.** Suunnittelijan (S) ja betonin valmistajan (B) tehtävät tavanomaisten betonirakeiden käyttöikäsuunnittelussa. [5, s. 10]

Rasitusluokkaryhmä	Rasitusluokka	Lujuusluokka	Betonipeite	Kiviaineksen ylänimellisraja (Maksimiraekoko)	Sementtityyppi	Vesi-sementtisuhte	Betonin ilmamäärä	Pakkaskestävyys (Testausmenetelmä)
X0/XC	S	S	S	S/B <sup>1</sup>	B	B <sup>3</sup>	-	-
XD/XS	S	S	S	S/B <sup>1</sup>	B/S <sup>2</sup>	S <sup>4</sup>	-	-
XF	S	S	S	S/B <sup>1</sup>	B	B	B	B
XA	S	S	S	S/B <sup>1</sup>	B/S <sup>2</sup>	B	-	-

1) Mikäli raudoitus rajoittaa kiviaineksen maksimiraekokoa, suunnittelija merkitsee kiviaineksen ylänimellisrajan (maksimiraekoon) suunnitelmiin. Samoin mikäli esimerkiksi tavoitellaan vähän kutistuvaa betonia, suunnittelija voi asettaa kiviaineksen maksimiraekoolle vaatimustason. Mikäli suunnittelija ei ole asettanut vaatimuksia kiviaineksen raekoolle, on suositeltavaa että se sovitaan aloituskokouksessa.

2) On suositeltavaa, että vaativissa kohteissa suunnittelija ja betonin valmistaja valitsevat yhdessä sementtityypin.

3) X0 ja XC rasitusluokissa vesi-sementtisuhteen valitsee normaalisti betonin valmistaja vaatimusten mukaisesti. Mikäli kuitenkin tavoitellaan esimerkiksi vähän kutistuvaa betonia, voi suunnittelija esittää tavoitearvon. Tällöin on suositeltavaa, että suunnittelija ja betonin valmistaja valitsevat yhdessä käytettävän betonilaadun.

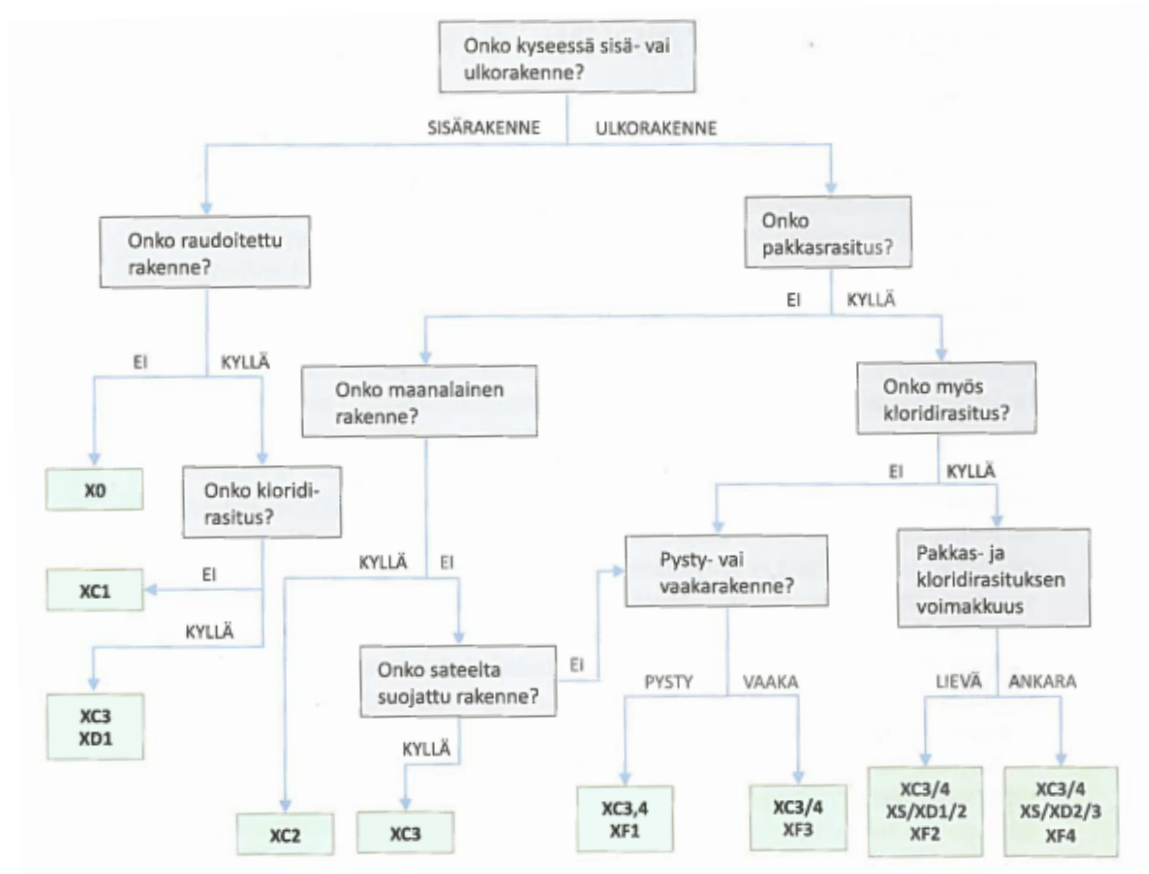
4) XD ja XS rasitusluokissa vesi-sementtisuhte ja betonipeite ovat riippuvaisia toisistaan ja siten suunnittelijan on tehtävä valinta molempien osalta. Vesi-sementtisuhte on myös merkittävä piirustuksiin. Suunnittelijan on kuitenkin tarkistettava, että valittu vesi-sementtisuhteen arvo on sopusoinnussa muiden vaatimusten (esimerkiksi puristuslujuuden) kanssa ja että kyseisellä vesi-sementtisuhteella betoni voidaan valmistaa.

Rakenteiden käyttöikämitoitus voidaan suorittaa joko taulukkomitoituksella kaikissa ympäristön rasitusluokissa tai laskennallisella mitoituksella [5, s. 11]. Laskennallinen mitoitus pohjautuu standardiin ISO 15686-1, jota suomalaiset tutkijat ovat kehittäneet [5, s. 11]. Laskennallinen mitoitus on myös esitetty teoksessa by 65 Betoninormit 2016 [4], eikä sitä tässä työssä käydä läpi. Taulukkomitoitukseen esitetään tarvittavat tiedot suunnitteluohjeessa (liite A).

Betonirakenteiden rasitusluokat perustuvat yhteen vaikuttavaan vauriomekanismiin, joten käytännön suunnittelussa useimmiten rakenteille täytyy valita useampi kuin yksi rasitusluokka niitä suunnitellessa. Kaikkien muiden rasitusluokkien kanssa on aina muitakin vaikuttavia rasitusluokkia, paitsi X0- ja XC-rasitusluokat, jotka voivat esiintyä ilman muita rasituksia. Rasitusluokat eivät ole aina hirveän tarkasti jaoteltuja, jolloin suunnittelijan tulee valita rasitusluokka mahdollisimman lähelle todellista rasitusta. Rasitusluokkien valitseminen varman päälle saattaa heikentää betonirakenteen laatua, esimerkiksi kasvattamalla betonin peitepaksuutta, joka johtaa suurempaan halkeilurisktiin.



Ohjeita ja esimerkkejä rasitusluokkien ja rasitusluokkayhdistelmien valinnasta käytännön rakenteissa löytyy esimerkiksi julkaisusta by 68 [5]. Rasitusluokkayhdistelmien valintaa on havainnollistettu kuvassa 18. [5, s. 29-30]



**Kuva 18.** Betonin rasitusluokkien yksinkertaistettu valinta, ilman XA-rasitusluokkaa. [5, s. 30]

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu on hyvä yhdistää rakennesuunnitteluun, jolloin molempien asettamista vaatimuksista saadaan ajallaan yhteensopivia. Näin voidaan huomioida molempien asettamat vaatimukset esimerkiksi lujuusluokan kautta. Käytännössä tämä saattaa olla hankalaa, sillä monia erilaisia vaikutuksia tulee huomioida. Vesi-sementtisuhde ja puristuslujuus korreloivat läheisesti toisiaan ja ne mielletäänkin betonin tärkeimmiksi ominaisuuksiksi. Liian alhainen vesi-sementtisuhde voi muodostua ongelmaksi betonin työstettävyyden, kutistuman ja halkeilun näkökulmasta. Liian korkea vesi-sementtisuhde puolestaan saattaa hidastaa lujuudenkehitystä, pienentää pinnoittamattoman betonin kulutuksenkestävyyttä sekä pienentää betonin vesitiiviyyttä. [5, s. 37-51]

Betonirakenteiden rasitusluokkien tulee vastata ympäristön todellisia rasitusolosuhteita [5, s. 13]. Joissain lähteissä (kuten [5, s. 29] [6]) on käsitelty betonin koostumuksen ylivoittamisesta rasitusluokille. Harkinnan varaisesti rasitusluokan nostaminen voi parantaa betonin kemikaalikestävyyttä eli toisin sanoen käyttöikää [6], mutta myös kasvattaa rakennuksen kustannuksia [5, s. 29]. Rasituksen ylivoittaminen ei välttämättä pa-

ranna betonirakenteen laatua, vaan voi myös heikentää sitä esimerkiksi lisäämällä rakenteen halkeiluriskiä tai kutistumaa [5, s. 13,28]. Mikäli betonin koostumuksella ei saada hyväksyttävää käyttöikää betonirakenteelle, betonin pinnoittaminen on vaihtoehto.

## **6.1 Betonin käyttöikäsuunnittelun erikoispiirteet kemikaalien rasittamassa ympäristössä**

Betonin kemiallinen XA-rasitusluokka voidaan valita taulukon 27 mukaisesti. Raja-arvot on määritelty vain luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttamille kemiallisille rasituksille. Aggressiivisten kemikaalien ympäristöjen luokittelu perustuu maaperään ja pohjaveteen, joiden lämpötila on 5 – 25 °C ja veden virtausnopeus oletetaan niin hitaaksi, että kyseessä on lähes staattinen tapaus [25]. Teollisuudessa esiintyville kemikaaleille ei ole saatavilla vastaavaa jakaumaa, mutta tiettyjä raja-arvoja voi soveltaa harkitusti (esimerkiksi pH-arvo). Sulfaattipitoisuuden ollessa luokan XA1 rajoissa, betonin vaatimuksena on vesi-sementtisuhde, kun taas voimakkaammissa sulfaattipitoisissa ympäristöissä tulee käyttää SFS-EN 197-1 mukaista sulfaatinkestävää sementtiä, tai sideaineesta tulee olla masuunikuonaa vähintään 70 % [5, s. 26]. Mikäli kaksi tai useampi aggressiivista ominaisuutta johtaa samaan luokkaan, ympäristö luokitellaan seuraavaan korkeampaan luokkaan, mikäli erityisellä selvityksellä ei osoiteta, ettei se ole tarpeen [25].

Taulukko 27 koskee vain luonnon kemiallisia rasituksia. Betonistandardissa SFS-EN 206 [25] on määritelty betonin kemiallista rasitusta, joka ei kuulu taulukon 27 raja-arvoihin. Standardin mukaan on mahdollista suorittaa erikoistutkimus oikeiden ympäristöolosuhteiden määrittämiseksi, kun ollaan taulukon 27 raja-arvojen ulkopuolella, ympäristössä on muita aggressiivisia aineita, vesi on kemiallisesti saastunutta tai veden virtausnopeus on suuri sen sisältäessä taulukon 27 mukaisia kemikaaleja. Ympäristön muut aggressiiviset kemialliset aineet, kuten kemikaalit, tulee tunnistaa. Mahdollisesti saastunut maaperä tai vesi tulee huomioida. Mikäli virtausnopeus vedessä on suuri ja vesi sisältää taulukon 27 mukaisia kemikaaleja, rasitus on erityisen suuri.

**Taulukko 27.** Luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasituksen rasisitusluokkien raja-arvot. [5, s. 26] [25]

Kemiallinen ominaisuus	Koemenetelmä	XA1	XA2	XA3
<b>Pohjavesi</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg / l	SFS-EN 196-2	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3000	> 3000 ja ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg / l aggressiivinen	SFS-EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg / l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg / l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymiseen asti
<b>Maaperä</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg / kg <sup>1)</sup> kokonaismäärä	SFS-EN 196-2 <sup>2)</sup>	≥ 2000 ja ≤ 3000 <sup>3)</sup>	> 3000 <sup>3)</sup> ja ≤ 12000	> 12000 ja ≤ 24000
Happamuus Braumann Gullyn mukaisesti ml / kg	prEN 16502	> 200	Ei esiinny käytännössä	

1) Savimaat joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10<sup>-5</sup> m/s voidaan luokitella alempaan luokkaan.

2) Testausmenetelmä periaate on uuttaa SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> suolahapolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on siitä kokemusta.

3) Raja-arvo 3000 mg / kg lasketaan arvoon 2000 mg / kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen saattavat aiheuttaa betonin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.

Kemikaalirasitukset ovat haastavia suunnittelijan kannalta ja todellisten rasitusten tietäminen voi olla vaikeaa [5, s. 9]. On suositeltavaa, että suunnittelija valitsee sementtityypin tai sementin sideaineen voimakkaan kemiallisen rasituksen ympäristössä (esimerkiksi luokat XA2 ja XA3) [5, s. 9-10]. XA1-rasitusluokassa tämä ei ole välttämätöntä, mutta muissa luokissa ja luokituksen ulkopuolisilla kemikaaleilla suositeltavaa.

Betonirakenteen geometrialla ja mahdollisilla kaadoilla on vaikutus rakenteen kemikaalikestävyyteen. Mikäli rakenteen pintaan muodostuu epätasaisuuksia, kuten uria, kemikaalit voivat päästä jäämään niihin ja kohdistetusti rasittavat betonia tai pyrkivät tunkeutumaan sen sisään. Teollisuusrakentamisen kohteissa rakenteiden toiminnallisuus asettaa välillä haastavan muotoisia geometrioita vaadittaville rakenteille, jolloin tulee pyrkiä tunnistamaan kohdat, jotka voisivat olla erityisen alttiita kemikaalien aiheuttamalle rasitukselle.

Lisäksi tulee huomioida betoniin liitettävien rakennusosien, kuten teräksisten kiinnityslevyjen, kestävyys. Muidenkin materiaalien tulee kestää betoniin kohdistuvat kemialliset rasitukset, sekä ylipäänsä betonin emäksisyys ei saa nousta ongelmaksi. Tarvitta-

essa kiinnityslevyjen ja muiden vastaavien teräksisten rakennusosien materiaaliksi on hyvä valita kuumasinkitty, ruostumaton tai haponkestävä materiaali.

Standardi SFS-EN 14879-3 [77] listaa betonirakenteelle haitallisia aineita, jotka esiintyvät tyypillisesti teollisuuslaitoksissa ja joiden yhteydessä usein käytetään pinnoitteita. Standardi luokittelee aineet epäorgaanisiin ja orgaanisiin kemikaaliluokkiin. Standardi myös esittelee luokitukset nestekuormituksen tyypille ja toistuvuudelle. Standardissa esitellään tyypillisiä kemikaalien esiintymisyhdistelmiä kemikaaliluokittain, nestekuormitustyypeittäin sekä lämpötilan, mekaanisen kuormituksen ja ilmastovaikutusluokituksen huomioiden. Standardi suosittelee joko betonipinnan pinnoittamista, vuoraamista tai komposiittimateriaalien käyttämistä. Käytettävä tuote tulisi määrittää suositellun pinnansuojaustyyppin mukaisesti ja testata käytettävä tuote kyseiselle kuormitusyhdistelmälle standardin määritelmien mukaisesti. Taulukossa 28 esitetään yleisesti teollisuudessa käytettäviä kemikaaleja, joiden tiedetään vaurioittavan betonirakenteita ja joiden kanssa suositellaan käytettävän pinnoitusta.

**Taulukko 28.** Yleisesti teollisuudessa käytettävien, betonirakenteiden pinnoitusta vaativien kemikaalien luokittelu standardin SFS-EN 14879-3 mukaisesti. [77]

Kemikaalin tyyppi	Esimerkkejä	
I. Epäorgaaniset kemikaalit		
Epäorgaaniset ei-hapettavat hapot	HCl	Suolahappo
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Rikkihappo, enintään 70 %
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Fosforihappo
Epäorgaaniset hapettavat hapot	HNO <sub>3</sub>	Typpihappo
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Rikkihappo, yli 70 %
	CrO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Kromihappo
	HClO <sub>3</sub>	Kloorihappo
Epäorgaaniset piioksidia (SiO <sub>2</sub> ) liuottavat hapot	HF	Fluorivetyhappo
	H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Heksafluoripiihappo (sis. fluorivetyhappoa)
	HBF <sub>4</sub>	Fluoriboorihappo (sis. fluorivetyhappoa)
Suolat	NaCl	Natriumkloridi
	KOH	Kalsiumhydroksidi
	CaO, Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiumoksidi, kalsiumhydroksidi
	NH <sub>4</sub> OH	Ammoniakkiliuos (ammoniumhydroksidiliuos)
Hapettavat emäkset	NaOCl	Natriumhypokloriitti
II. Orgaaniset kemikaalit		
Orgaaniset hapot	HCOOH	Muurahaishappo
	CH <sub>3</sub> COOH	Etikkahappo
	CH <sub>2</sub> ClCOOH	Kloorietikkahappo
	(COOH) <sub>2</sub>	Oksaalihappo
	CH <sub>3</sub> CHOHCOOH	Maitohappo
Alifaattiset hiilivedyt	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	Heksaani
	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Oktaani
Aromaattiset hiilivedyt	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Bentseeni
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Tolueeni
	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ksyleeni

Alkoholit	CH <sub>3</sub> OH C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH CH <sub>2</sub> OHCH <sub>2</sub> OH	Metanoli Etanoli Butanoli Etaanidioli
Aldehydit, ketorit, esterit	CH <sub>2</sub> O CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COCH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	Formaldehydi Asetoni Metyylietyyliketoni (2-butanoni) Etyyliasetatti
Alifaattiset halo- genoidut hiilivedyt	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	Dikloorimetaani Trikloorietyleeni Triklooritrifluorietaaani
Aromaattiset halo- genoidut hiilivedyt	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl ClC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> CF <sub>3</sub>	Klooribentseeni Klooritrifluorimetylibentseeni
Alifaattiset amiinit ja pyridiini	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> N NH <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> NH <sub>2</sub>	Metyyliamiini Trietyyliamiini Etyleenidiamiini
Aromaattiset amii- nit	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	Aniliini Pyridiini
Fenolit	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> OH	Fenoli Kresoli
Rasvat, öljyt		Kasvis- ja eläinrasvat ja -öljyt

Standardin SFS-EN 14879-3 [77] mukaisesti nestekuormitukset voidaan jakaa seitsemään luokkaan niiden tyypin ja toistuvuuden perusteella. Nämä luokitukset on listattu taulukkoon 29.

**Taulukko 29.** Teollisuuslaitosten nestekuormituksen tyyppi ja toistuvuus. [77]

Luokka	Kuvaus
0	Ei altistusta nesteille
1	Satunnainen altistus nestepisaraille (esimerkiksi laboratorion lattiat, pienten yksikköjen lattiat, seinät)
2	Usein toistuva lyhytaikainen altistus nesteroiskeille paikoissa, joiden pinnat huuhdellaan säännöllisesti (esimerkiksi suljettujen tuotantolaitosten lattiat)
3	Poikkeuksellinen ja rajallinen altistus nesteille laitoksen toiminnan aikana (esimerkiksi häiriötilanteessa) esimerkiksi valuma-altaassa
4	Jatkuva tai usein toistuva altistuminen nestekalvolle kosteuden, kondenssation, lammikoiden, valumien ja vastaavien ilmiöiden takia (esimerkiksi tuotantolaitosten lattiat, galvanoimislaitokset tai pumppausasemat)
5	Käytönaikainen altistuminen jatkuvalle nestevirrälle, mihin ei sisälly merkittävää hydrostaattista painetta (esimerkiksi kourut, kanavat ja niiden sakkakaivot, katetut kanavat ja putket)
6	Jatkuva altistuminen osan sisältämälle nesteelle rajoittamattomia aikoja (esimerkiksi säiliöt ja kaivot)

Yhdessä standardin kemikaalityypin jaotteluiden kanssa on mahdollista muodostaa erilaisten alueiden kuormitusprofileja sekä valita pintasuojauksen tyyppi pinnoitteesta, vuorauksesta tai komposiitista [77]. Tämä on kuitenkin aika teoreettista luokittelua, eikä

tue käytännön suunnittelua, joten tässä työssä ei nähdä relevantiksi esitellä asiaa yksityiskohtaisemmin.

Suunniteltaessa kemikaalirasitusta kestävää betonia, suunnittelijan tulee aina tarkastella asiaa kemikaalikohtaisesti. Lähtötietojen tarkkuus on erittäin tärkeää suunniteltaessa kemikaalinkestävää betonirakennetta, sillä yleispätevää ratkaisua ei ole. Lähtötietojen perusteella tulee saada selville teollisuuslaitoksen prosessi ja mahdolliset tuotteet betonin rasituksen arvioimiseksi. Käytettävät kemikaalit ja niiden vahvuudet tulee saada selville, kuten myös kemikaalien vaikutusajat ja lämpötilat. Sopivaa betonia valitessa tulee huomioida myös muut rakenteeseen kohdistuvat rasitukset sekä työstettävyyden laadukkaan lopputuloksen varmistamiseksi.

Standardit ja ohjeet eivät tarjoa yleisesti päteviä rasitusluokituksia kemikaalityypeittäin, koska niiden vaikutukset ovat pitkälti yksilöllisiä. Standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti kemiallisesti rasitetulle betonille ei ole erillistä pienintä vaadittua betonin peitepaksutta, vaan peitepaksuus määräytyy muiden rasitusluokkien perusteella [36]. Luvussa 3 on pyritty esittelemään kemikaaleja luokittain ja tarjoamaan suosituksia miten suojata betonia niiden vaikutukselta koostumuksen kautta. Luvussa 4 on esitelty kemiallisten rasitusten ja kemikaalien vauriomekanismeja ja niiden kohdistumista betonin rakenteen ainesosiin, joiden avulla voi pyrkiä parantamaan betonin koostumusta kestävämmän vauriomekanismia paremmin. Luvussa 5.2 on esitelty betonin pinnoitustyyppejä ja pyritty kertomaan niiden kemikaalien kestoista, mutta usein tarkan kuvan saa vain varmistamalla betonin pinnoitteen valmistajalta pinnoitteen kemikaalinkestoa.

## 7. KEMIALLISEN RASITUKSEN VAURIOITAMAN BETONIN KORJAAMINEN

Betonirakenteen korjaustarpeen laittaa yleensä alulle betonirakenteen visuaalisesti erottuva vaurioituminen, kuten halkeilu [8, s. 553]. Vaurioituminen on kuitenkin voinut alkaa jo ennen näkyvää vauriota, mutta pinnan alaiset vauriot voidaan havaita vain erikseen tehtävällä kuntotutkimuksella [8, s. 553]. Vaurion syyn selvittäminen on tärkeä osuus betonirakenteen korjaamista, sillä mikäli sitä ei tunnisteta oikein, korjattu osuus saattaa vaurioitua uudelleen nopeasti [41, s. 28]. Vaurioitumisen syyn selvityksen perusteella tehdään päätös siitä, kuinka laaja-alainen vaurionkorjaus tarvitaan [41, s. 59]. Ennen korjaustoimenpiteitä tulee selvittää korjauksen tarpeellisuus ja laajuus ja ne voivat riippua rakenteelle asetettavista esteettisistä vaatimuksista toiminnallisuuden lisäksi [41, s. 59]. Oikealla ja laadukkaalla korjauksella lisätään rakenteen käyttöikää ja vähennetään ylläpitokustannuksia, vaikka alkuperäinen investointi tuo lisäkustannuksia [41, s. 59]. Käytettävien korjaustuotteiden tulee olla CE-merkittyjä ja niiden tulee olla ominaisuuksiltaan, laadultaan sekä käyttötarkoitukseltaan kohteeseen sopivia [80, s. 10].

Kemikaalien aiheuttamaa vauriota korjattaessa on syytä selvittää miten laajalle vaurio on edennyt. Tulee selvittää betonin tunkeutuma-alue ja tunkeutumissyvyys sekä onko kemikaalia mahdollisesti vielä betonin sisässä piilossa. Näiden avulla voidaan arvioida onko tarvetta laajempialaiseen piikkaustarpeeseen kuin esimerkiksi visuaalisesti vaurioitunut osa. Betonin vaurioitumismekanismit kyseisen kemikaalin vaikutuksen alaisena tulee huomioida, jotta tiedetään mitä betonin rakenteelle on tapahtunut mahdollisimman tarkasti. Vaurioista tulisi tunnistaa oikein niiden tyyppi, laajuus, aste, aiheuttaja, vaikutukset sekä eteneminen ennen korjausmenetelmän valintaa [8, s. 555].

### 7.1 Korjaustavat ja korjausperiaatteet

Betonirakenteet korjaamisessa on erilaisia korjaustapoja ja -periaatteita. Korjausperiaatteet määräytyvät korjauksen vaikutuksen mukaisesti eli miten korjaus vaikuttaa rakenteen fysikaaliseen toimintaan tai toimivuuteen. Korjaustavat puolestaan ovat käytännön toteutusmenetelmiä, joilla saadaan aikaan korjausperiaatteiden mukaisia lopputuloksia. Taulukossa 30 esitellään suomalaisessa korjausrakentamisessa käytettävää korjausasteen mukaista korjausperiaatejaottelua. Myös standardi SFS-EN 1504 listaa korjausperiaatteita ja -tapoja, mutta ne ovat suhteellisen teoreettisesti jaoteltuja, eivätkä ne ole suoraan kaupallisesti saatavilla. Korjausperiaatteen valintaan vaikuttavat tekniset, taloudelliset ja arvostukselliset sekä yhteiskunnalliset seikat. Teknisiä seikkoja ovat esimerkiksi rakenteellinen varmuus ja turvallisuus, vauriotilanne ja siitä seuraava korjaustarve, suojaustarve, korjaustavan kyky poistaa ongelmat ja vauriot, korjauksen työtekniikka, korjaukseen liittyvät riskit sekä liittyvien rakenteiden korjaustarve. Taloudellisia ja arvos-

tuksellisia seikkoja ovat rakenteen käyttöikä, korjauskustannukset, ylläpito- ja käyttökustannukset, vaikutukset energiatehokkuuteen, vaikutukset ulkonäköön, korjaustyön aikaiset haitat, ympäristöystävällisyys sekä toiminnalliset vaikutukset. Yhteiskunnallisia seikkoja ovat vaikutus ympäristöön (kaupunkikuvaan), kaavamääräykset sekä suojelutarve tai -päätökset. [8, s. 556-557]

**Taulukko 30.** Betonirakenteiden korjausasteen ja korjauskäsittelyjen mukainen korjaustapajaottelu. [8, s. 556]

Korjausperiaate	Korjaustapa
Säilyttävä korjaaminen	Impregnointi Pinnoittaminen Ylitasoitus Laastipaikkaaminen Valukorjaaminen Halkeamien imeyttäminen, sulkeminen tai injektointi
Muuttava korjaaminen	Rakenteen pinnan verhoilu (käsittää yleensä myös lisälämmöneristämisen) Ruiskubetonointi Rakenteen vahvistaminen
Rakenteen uusiminen	Rakenteen purkaminen ja uudelleen rakentaminen joko kokonaan tai osittain
Erikois menetelmät	Uudelleenalkalointi (sähkökemiallinen ja passiivinen) Katodinen suojaus Sähkökemiallinen kloridien poisto Inhibointi

Korjausperiaatetta valitessa pyritään etsimään alussa kaikki teknisesti kelvolliset vaihtoehdot, jotka ratkaisevat kohteen tekniset ongelmat [8, s. 557]. Sen jälkeen tarkastellaan taloudellisten ja arvostuskysymysten sekä muiden reunaehtojen näkökulmasta paras vaihtoehto [8, s. 557]. Korjaustapoja on esitelty yksityiskohtaisemmin esimerkiksi by 201 Betonitekniiikan oppikirja 2018:ssa [8] sekä by 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016:ssa [80]. Monet korjaustavat soveltuvat hyvin pieniin kemikaalien aiheuttamiin vaurioihin, kunhan voidaan varmistua, että kaikki rapautunut aines saadaan poistettua betonirakenteesta ennen varsinaiseen korjaustyöhön ryhtymistä.

## 7.2 Halkeamien korjaaminen

Betonirakenteen halkeilun kohdalla syntyajankohdan ja halkeilutyypin selvittäminen on tärkeää [41, s. 28]. Halkeamissa tapahtuvat muodonmuutokset tulee selvittää [41, s. 66]. Halkeamien korjaamiseen on olemassa laaja valikoima materiaaleja, jotka sopivat erilaisiin käyttökohteisiin [41, s. 66]. Erityistä huomiota on syytä kiinnittää raudoitteiden korroosiosta, pakkasvaurioista tai kemiallisista reaktioista johtuviin halkeamiin, jotka vaativat laaja-alaisempaa korjausta kuin muut halkeamatyypit [41, s. 59].



Halkeamat jaetaan stabiileihin ja epästabiileihin halkeamiin niiden tyypin mukaisesti. Stabiilit halkeamat eivät todennäköisesti elä eli eivät avaudu, sulkeudu tai laajene. Ne jaotellaan hiushalkeamiin (halkeaman leveys  $< 0,5$  mm, siirtää kuormat halkeaman yli), keskisuuriin halkeamiin ( $0,5 \dots 1,5$  mm, siirtää kuormat osittain) ja laajoihin halkeamiin ( $> 1,5$  mm, kuormat eivät siirry halkeaman yli). Halkeamaleveyden ollessa yli 5 mm, halkeamaa kutsutaan murtumaksi. Epästabiileissa halkeamissa tapahtuu liikkeitä esimerkiksi lämpötilan, kosteuden tai kuormituksen muuttuessa. Laajat epästabiilit halkeamat ovat merkki raudoitteiden myötäämisestä ja rakenteen vahvistustarpeesta. [41, s. 60]

Halkeamien korjaamisessa käytettävien materiaalien tulee täyttää standardin SFS-EN 1504 mukaiset vaatimukset. Halkeamia korjataan yleisesti injektoimalla halkeamiin, jolloin halkeamat saadaan toimimaan rakenteellisesti. Halkeamien korjaukseen käytettäviä materiaaleja ovat halkeamatyyppin mukaan:

#### Stabiilien halkeamien korjausmateriaalit

- sementtilaastit
- epoksihartsit
- polyesterihartsit
- synteettiset lateksit

#### Epästabiilien halkeamien korjausmateriaalit

- polyuretaanihartsit
- akryyligeelit
- joustavat epoksihartsit. [41, s. 60]

## 8. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käsiteltiin betonin kemiallista kestävyyttä sekä kemikaalikestävyyttä. Erityisesti pyrittiin huomioimaan ja esittelemään teollisuusrakentamisessa vaikuttavia kemikaaleja ja näkökulmia, sillä niitä ei yleisesti tunneta erityisen hyvin. Tämä tuli selväksi lähdemateriaalia etsiessä: lähes kaikki betonin kemiallista kestävyyttä käsittelevät ohjeet ja tutkimukset, jotka tulivat työn tekijälle vastaan, käsittelivät luonnollisista lähteistä aiheutunutta kemiallista rasitusta.

Teollisuusrakentamisen erityispiirteenä on erilaisissa teollisuustehtaissa käsiteltävien kemikaalien laaja kirjo, joka johtaa siihen, että yleispätevää ohjetta ei voida, eikä olisi järkevää yrittää tehdä. Tämä johtaisi liian usein joko ali- tai ylimitoitukseen. Kemikaalien laajan kirjon ja kohdemääräisesti suhteellisen pienen sektorin koon johdosta, ei ole kemikaalikohtaisia tarkkoja ja luotettavia tutkimuksia, joissa on tutkittu miten betoni sietää tiettyä kemikaalia. Työssä pyrittiin tunnistamaan erilaisia yleisiä ja tyypillisiä kemikaaliryhmiä kokonaisuutena. Monet käsitellyistä kemikaaliryhmistä esiintyvät myös luonnollisesti, joten ohjetta voidaan soveltaa myös tavanomaisia betonirakenteita suunniteltaessa.

Koska yleisesti ei ole kattavaa listaa kaikista mahdollisista kemikaaleista, kemikaalin väkevyyttä ja pH-arvoa voidaan pitää alustavina indikaattoreina, mikäli muuta tietoa ei ole saatavilla. Monille yleisille kemikaaleille kuitenkin on olemassa tutkimuksia ja erityisesti pinnoitevalmistajilla on tietoa omien tuotteiden kestävyyksistä, mikäli suunnittelijalla ei ole varmuutta onko kemikaali aggressiivista betonille.

Betonin kemiallisen kestävyuden tärkein ominaisuus on betonin tiiviys. Tiivis betoni tekee betonista kestävämpää kaikkia ulkopuolisia kemiallisia rasituksia kohtaan. Vaikka tiivis betoni ei käytännössä estäkään esimerkiksi rikkihapon betonia rapauttavaa vaikutusta, tiiviys hidastaa rapautumisen etenemistä. Tästä syystä on suositeltavaa pyrkiä tiiviiseen betonirakenteeseen, vaikka betonin päälle tulisikin pinnoite, sillä pinnoitteet vaurioituvat ja niillä on rajallinen käyttöikä, eikä niitä aina uusita ajallaan.

Betonin kemiallista kestävyyttä tiettyä kemikaalia kohtaan tarkasteltaessa tärkeintä on tunnistaa kemikaalin aiheuttama vaurioitumismekanismi oikein. Kun tiedetään kemikaalin aiheuttama vauriomekanismi ja ymmärretään sen toimintaa, voidaan estää betonin vaurioitumista betonin koostumuksella, mikrorakenteen ominaisuuksilla tai rakenteellisilla seikoilla. Rakenteellisilla seikoilla tarkoitetaan esimerkiksi betonipinnan kalistuksia tai tuuletuksen järjestämistä.

Betonin koostumuksella voidaan parantaa betonin kemiallista kestävyyttä kemikaalikohtaisesti vähentämällä kemiallisesti reagoivaa osa-ainetta betonista. Tämä voidaan to-

teuttaa suoraan vähennyksenä, kuten sulfaatinkestävän SR-sementin tapauksessa betonissa käytettävän sementin  $C_3A$ -pitoisuutta rajoitetaan suurimpaan sallittuun arvoon. Monissa tapauksissa ei voida suoraan vähentää tiettyä ainesosaa betonista niin merkittävästi, että aggressiivisen kemikaalin kemialliset reaktiot estyisivät. Tällöin voidaan käyttää betonin sideaineena portlandsementin sijasta sementin seosaineita, joista kaikista yleisimpiä ja SFS-EN standardeissa hyväksyttyjä ovat lentotuhka, jauhettu granuloitu masuunikuona sekä silika. Näiden käyttö perustuu siihen, että hydrataatiossa muodostuu vähemmän kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksidia, joiden kanssa useat aggressiiviset kemikaalit reagoivat. Myös muita mahdollisia betonin sideaineita on tutkimuksien alaisena sekä mahdollisesti kaupallisena, mutta työn tekemishetkellä ei tullut vastaan riittävän vakuuttavan oloista ja kaupallisesti valmista betonin sideainetta. Monet tutkimukset ovat antaneet lupaavia tuloksia esimerkiksi erilaisten kierrätysmateriaalien ja nanomateriaalien käytöstä betonin sideaineena.

Betonin säilyminen ehjänä sen elinkaaren ajan on tärkeää, sillä heikkoudet betonissa, kuten halkeamat ja sisäiset mikrohalkeamat, heikentävät betonin kestävyyttä huomattavasti. Halkeamat helpottavat kemiallisten yhdisteiden tunkeutumista betoniin ja pahimmassa tapauksessa ne pääsevät betoniterästen tasolle huomattavan nopeasti rasittamaan betoniteräksiä. Huomattavan kemiallisen rasituksen alaisena olevassa betonissa on suositeltavana käyttää normaalia tiukempia halkeamaleveyden raja-arvoja.

Mikäli betonin koostumuksella ja rakenteellisilla seikoilla ei saada varmistettua betonin kemiallista kestävyyttä, voidaan harkita betonin pinnoittamista. Betonin pinnoittamisen ei tule olla ensisijainen vaihtoehto kemikaalinkestävää betonia suunniteltaessa, sillä pinnoittaminen on lähes poikkeuksetta kalliimpi vaihtoehto kuin betonin koostumukseen vaikuttaminen. Poikkeuksena tästä ovat teollisuusrakentamiselle tyypilliset kohteet, joissa on raskasta trukkiliikennettä ja mahdollisia iskuja ja jotka tarvitsevat raskaan pinnoitteen mekaanisen kestävyysnäkökulmasta. Tällöin voidaan usein valita pinnoite, joka kestää sekä mekaanisia että kemiallisia rasituksia.

Betonia pinnoitettaessa kemiallisen rasitustekijän johdosta, on syytä varmistaa betonin pinnoitteen valmistajalta pinnoitteen kestävyys vaikuttavan kemikaalin osalta, sekä pinnoitteen muut kestävyysominaisuudet. Pinnoitteiden valmistajien voidaan olettaa tietävän omien tuotteidensa kestävyysarvot ja monilla on erilaisia taulukoita yleisten kemikaalien kestävyyksistä.

Teollisuuskohteissa voi usein olla merkittävää kosteus- tai lämpörasitusta, joka saattaa rasittaa betonin pinnoitetta huomattavasti betonia enemmän. Toisin kuin betoni, monet pinnoitteet eivät kestä korkeampia lämpötiloja ( $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), jolloin tulee valita erityisvalmistein pinnoite. Mikäli sopivaa pinnoitetta ei löydy, tulee harkita esimerkiksi ke-raamisia laattoja, jotka kestävät korkeita lämpötiloja huomattavasti enemmän. Kuumat nesteet (vesi ja kemikaalit) sulattavat pinnoitteen huomattavasti lämpösäteilyä nopeammin, joten kuuman nesteen roiskevaaran ollessa mahdollista, pinnoitetun betonilattian kaadot tulee suunnitella toimiviksi.

Ei ole olemassa yksityiskohtaista ja kattavaa listaa kemikaaleittain eroteltuna siitä, mikä kemikaalin vaikutuksesta betonirakenne tulee pinnoittaa ja milloin kestävyys voidaan varmistaa koostumuksella. Erilaisia taulukoita ja suosituksia eri kemikaalityypeittäin löytyy ja on käytetty tässäkin työssä, mutta niitä tulee aina tulkita tapauskohtaisesti. Pelkän kemikaalityypin lisäksi kemikaalin vaikutusaika, pitoisuus, happamuus, lämpötila ja betonipinnan kaltevuus vaikuttavat. Mikäli kyseessä on esimerkiksi betoninen säiliö tai siilo, jossa rasitus on jatkuvaa, betonin pinnoittaminen on suositeltavaa. Vaikka kemikaalin satunnaiset roiskeet pystyttäisiin hallitsemaan betonin koostumuksella ja tiiviydellä, pinnoittamisella voidaan päästä käyttöään merkittäviin pidennyksiin jatkuvan rasituksen alaisissa kohteissa.

Suunniteltaessa teollisuusrakentamisen kohteen kemiallista kestävyyttä tulee huomioida kyseisellä alueella käytettävä, tuotettava tai varastoitava tuote. Tämän jälkeen arvioidaan kuinka todennäköistä aineen ja betonipinnan kontakti on. Lisäksi kun kyseessä on betonilattia, tulee tietää alueella tapahtuva trukkiliikenne, joka usein vaatii mekaanista rasitusta kestävä pinnoitteen. Näitä tietoja hyödyntäen suunnittelija tapauskohtaisesti valitsee kohteeseen taloudellisesti sopivan tavan varmistaa betonin kemikaalikestävyys joko betonin koostumuksen avulla, betonin pinnoitteen kautta tai rakenteellisilla seikoilla.

Betonin kemiallinen kestävyys on monimutkainen kokonaisuus, eikä sitä täysin ymmärretä tieteellisessä tutkimuksessa. Teknologia kuitenkin kehittyy ja ymmärrys aihealueeseen paranee jatkuvasti. Betonin kemiallinen kestävyys liittyy sementin ja kemiallisten yhdisteiden välisiin reaktioihin ja se vaatii kemian ja erityisesti sementtikemian ymmärrystä. Tässä työssä ei käsitelty sementtikemiaa tarkimmalla mahdollisella tasolla, vaan pyrittiin esittelemään monimutkaisia asioita tasolla, jota keskiverto rakennesuunnittelija pystyy ymmärtämään ilman sementtikemian tuntemusta. Mikäli työ olisi toteutettu sementtikemian käsitteillä ja reaktioyhtälöillä, siitä olisi tullut huomattavasti teoreettisempi, mikä ei ollut tämän diplomityön tarkoitus. Hyviä lähteitä sementtikemiaan tutustumiseen aiheesta kiinnostuneille ovat englanniksi [12] ja suomeksi [2].

## LÄHTEET

- [1] A. Kronlöf, T. Vehmas ja I. Anoshkin, Betoni on nanorakenne, Betoni, nro 4, 2010, s. 36-41.
- [2] P. Raivio ja H. Virola, Portlandsementin hydrataatio, VTT Tiedote, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 2000.
- [3] M. Leskelä, by 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry, 2008.
- [4] K. Johansson, T. Merikallio, T. Haara, A. Mantila ja T. Tikanoja, by 65 Betoninormit 2016, Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry, 2016.
- [5] J. Punkki ja H. Räisänen, by 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu - opas suunnittelijoille 2016, Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2016.
- [6] R. Davies, Concrete service in aggressive industrial environments, Concrete, osa/vuosik. 39, nro 6, 2005, pp. 32-35.
- [7] M. Çullu ja M. Arslan, The effects of chemical attacks on physical and mechanical properties of concrete produced under cold weather conditions, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 57, nro April, 2014, pp. 53-60.
- [8] Suomen Betoniyhdistys ry, by 201 Betonitekniikan oppikirja 2018, Helsinki: BY-Koulutus OY, 2018.
- [9] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 197-1 Sementti. Osa 1: tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012.
- [10] M. Asp-Lehtinen, KEB-61050 Kemian perusteet, luentomateriaali, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2017.
- [11] W. Chen ja H. Brouwers, Alkali binding in hydrated Portland cement paste, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 40, nro 5, 2010, pp. 716-722.
- [12] P. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth edition), Elsevier Science, 2003, 1087 p.

- [13] P. Iso-Mustajärvi, RAK-32200 Betonitekniikka, luentomoniste, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2016.
- [14] K. Scrivener, P. Juilland ja P. Monteiro, Advances in understanding hydration of Portland cement, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 78, 2015, pp. 38-56.
- [15] K. Scrivener ja A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 41, 2011, pp. 651-665.
- [16] H. Taylor, C. Famy ja K. Scrivener, Delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 31, 2001, pp. 683-693.
- [17] Suomen betoniyhdistys ry, by 52 Lentotuhkan käyttö betonissa 2008, Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry, 2008.
- [18] H. Minard, S. Garrault, L. Regnaud ja A. Nonat, Mechanisms and parameters controlling the tricalcium aluminate reactivity in the presence of gypsum, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 37, 2007, pp. 1418-1426.
- [19] J. Chen, C. Qian ja H. Song, A new chemo-mechanical model of damage in concrete under sulfate attack, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 115, 2016, pp. 536-543.
- [20] M. Kim, K. Kim ja Y. Ki, The Influence of C3A Content in Cement on the Chloride Transport, Advances in Materials Science and Engineering, 2016.
- [21] F. Bellmann, W. Erfurt ja H.-M. Ludwig, Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources, Cement & Concrete Composites, osa/vuosik. 34, 2012, pp. 86-93.
- [22] Suomen betoniyhdistys ry, by 43 Betonin kiviainekset 2007, Helsinki: Suomen Betonitieto Oy, 2007.
- [23] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 12620 + A1 Betonikiviainekset, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2008.
- [24] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 1008 Betonin valmistukseen käytettävä vesi. Näytteenotto, testaus ja veden soveltuvuuden arviointi betonin valmistukseen, mukaan lukien betoniteollisuuden prosesseista talteen otettu vesi, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2002.
- [25] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 206:2014+A1:2016 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2016.

- [26] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 450-1 Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013.
- [27] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 15167-1 Betoniin, laastiin ja juotuslaastin käytettävä jauhettu granuloitu masuunikuona. Osa 1: Määritelmät, määrittelyt ja vaatimuksenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006.
- [28] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 13263-1+A1 Betoniin käytettävä silika. Osa 1: määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [29] H. S. Arel, E. Aydin ja S. Kore, Ageing management and life extension of concrete in nuclear power plants, *Powder Technology*, nro 321, 2017, pp. 390-408.
- [30] M. Khan ja R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties, *Resources, Conservation and Recycling*, nro 57, 2011, pp. 30-35.
- [31] Q. Pu, L. Jiang, J. Xu, H. Chu, Y. Xu ja Y. Zhang, Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 28, nro 1, 2012, pp. 519-524.
- [32] A. Vollpracht, B. Lothenbach, R. Snellings ja J. Haufe, The pore solution of blended cements: a review, *Materials and Structures*, osa/vuosik. 49, nro 8, 2016, pp. 3341-3367.
- [33] M. Hoseini, V. Bindiganavile ja N. Banthia, The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review, *Cement & Concrete Composites*, nro 31, 2009, pp. 213-220.
- [34] N. Banthia, A. Biparva ja S. Mindess, Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, osa/vuosik. 35, 2005, pp. 1651-1655.
- [35] B. Salvoldi, H. Beushausen ja M. Alexander, Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 85, 2015, pp. 30-37.
- [36] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015.
- [37] Säteilyturvakeskus STUK, ”Ohje YVL A.8 Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta,” STUK, Helsinki, 2014.
- [38] L. Yang, Y. Tan ja H. Yu, Microstructural Evolution of Concrete under the Attack of Chemical, Salt Crystallization, and Bending Stress, *Journal of Materials in Civil*

Engineering, osa/vuosik. 29, nro 7, 2017.

- [39] A. Aguirre ja R. Mejía de Gutiérrez, Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas(esp.),Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions(engl.), Materiales de Construcción, osa/vuosik. 63, nro 309, 2013, pp. 7-38.
- [40] P. Fookes ja M. Walker, Natural aggregates in the performance and durability of concrete: chemical characteristics, Geology Today, osa/vuosik. 28, nro 1, 2012, pp. 20-25.
- [41] Suomen Betoniyhdistys ry, by 67 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta 2016, Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2016.
- [42] C. Drolet ja J. F. B. Duchesne, Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 157, 2017, pp. 263-276.
- [43] J. Aatsalo, Alkalikiviainesreaktio on vanhojen uimahallien riesa, Rakennuslehti, osa/vuosik. 52, nro 1, 2018, s. 8.
- [44] Y. Kawabata, J. Seignol, R. Martin ja F. Toutlemonde, Macroscopic chemo-mechanical modeling of alkali-silica reaction of concrete under stresses, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 137, 2017, pp. 234-245.
- [45] H. Yuan, P. Dangla, P. Chatellier ja T. Chaussadent, Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 53, 2013, pp. 267-277.
- [46] S. Larreur-Cayol, A. Bertron ja G. Escadeillas, Degradation of cement-based materials by various organic acids in agro-industrial waste-waters, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 41, 2011, pp. 882-892.
- [47] T. Gutberlet, H. Hilbig ja R. Beddoe, Acid attack on hydrated cement - Effect of mineral acids on the degradation process, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 74, 2015, pp. 35-43.
- [48] R. Beddoe ja K. Schmidt, Acid attack on concrete - Effect of concrete composition; part 1, Cement International, osa/vuosik. 7, nro 3, 2009, pp. 88-94.
- [49] E. Gruyaert, P. Van den Heede, M. Maes ja N. De Belie, Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 42, 2012, pp. 173-185.
- [50] S. Pavía ja E. Condren, Study of the Durability of OPC versus GGBS Concrete on Exposure to Silage Effluent, Journal of Materials in Civil Engineering, osa/vuosik.



20, nro 4, 2008, pp. 313-320.

- [51] A. Koenig ja F. Dehn, Biogenic acid attack on concretes in biogas plants, *Biosystems engineering*, nro 147, 2016, pp. 226-237.
- [52] M. Maes ja N. De Belie, Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate, *Cement & Concrete Composites*, osa/vuosik. 53, 2014, pp. 59-72.
- [53] Y. Chen, J. Gao, L. Tang ja X. Li, Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 106, 2016, pp. 650-658.
- [54] Z. Liu ja W. Hansen, Freeze-thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 102, pp, 2016. 478-485.
- [55] Suomen standardisoimisliitto, SFS 7022 Betoni. Standardin SFS-EN 206:2014 käyttö Suomessa, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015.
- [56] E. Rozière, A. Loukili, R. El Hachem ja F. Grondin, Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, *Cement and Concrete Research*, osa/vuosik. 39, 2009, pp. 1188-1198.
- [57] M. Rahman ja M. Bassuoni, Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 73, 2014, pp. 652-662.
- [58] J. Gao, Z. Yu, L. Song, T. Wang ja S. Wei, Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 39, 2013, pp. 33-38.
- [59] Z. Liu, D. Deng, G. De Schutter ja Z. Yu, Chemical sulfate attack performance of partially exposed cement and cement + fly ash paste, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 28, 2012, pp. 230-237.
- [60] E. Scholtzová, D. Tunega ja S. Speziale, Mechanical properties of ettringite and thaumasite - DFT and experimental study, *Cement and Concrete Research*, osa/vuosik. 77, 2015, pp. 9-15.
- [61] Y. Zhou, B. Ma, J. Huang, X. Li, H. Tan ja Z. Lv, Influence of Ca/Si ratio of concrete pore solution on thaumasite formation, *Construction and Building Materials*, osa/vuosik. 130, 2017, pp. 261-267.
- [62] Y. Song, S. Zhou, Z. Wang, B. Wang ja J. Qian, Mechanism of Thaumasite Formation in Concrete, *Journal of Wuhan University of Technology. Materials*

Science Edition, osa/vuosik. 32, nro 4, 2017, pp. 893-897.

- [63] T. Schmidt, B. Lothenbach, M. Romer, K. Scrivener, D. Rentsch ja R. Figi, A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, osa/vuosik. 38, 2008, pp. 337-349.
- [64] X. Cai, Z. He, Y. Shao ja H. Sun, Macro- and micro- characteristics of cement binders containing high volume fly ash subject to electrochemical accelerated leaching, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 116, 2016, pp. 25-35.
- [65] W. Müllauer, R. Beddoe ja D. Heinz, Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: Effect of fly ash and GGBS, Cement & Concrete Composites, nro 58, 2015, pp. 129-139.
- [66] J. Aromaa, CHEM-C2110 Materiaalitekniikan teolliset prosessit. Hydrometallurgia. Luentomoniste, Aalto-yliopisto, Espoo, 2016.
- [67] F. Girardi, W. Vaona ja R. Di Maggio, Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack, Cement & Concrete Composites, nro 32, 2010, pp. 595-602.
- [68] W. De Muynck, N. De Belie ja W. Verstraete, Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, Cement & Concrete Composites, nro 31, 2009, pp. 163-170.
- [69] T. Noeiaghaj, A. Mukherjee, N. Dhami ja S. Chae, Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies, Construction and Building Materials, osa/vuosik. 149, 2017, pp. 575-586.
- [70] Suomen betoniyhdistys ry, by 54 / BLY 12 Betonilattioiden pinnoitusohjeet 2010, Helsinki: Suomen Betonitieto Oy, 2010.
- [71] Suomen betoniyhdistys ry, by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014, Helsinki: BY-Koulutus OY, 2014.
- [72] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 1991-1-1 + AC Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2002.
- [73] E. Häkkä-Rönnholm, T. Haimala ja L. Rautiainen, BLY 11 Teollisuuslattioiden pinnoitus, VTT Rakennustekniikka, 1999.
- [74] FeRFA: The Resin Floor Association , Guide to the selection of synthetic resin flooring, FeRFA: The Resin Floor Association , Stone, Staffordshire, 2009.

- [75] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 13529 Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Testausmenetelmät. Voimakkaan kemiallisen rasituksen kestävyys, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2004.
- [76] PSK Standardisointi, ”PSK 2703 Betonilattioiden pintakäsittely. Käyttösuositus prosessiteollisuudelle,” PSK Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 2008.
- [77] Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 14879-3 Orgaaniset pinnoitteet ja vuoraukset teollisuuslaitteiden ja tuotantolaitosten suojaamiseen syövyttävien väliaineiden aiheuttamalta korroosiolta. Osa 3: Betoniosien pinnoitteet, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 2010.
- [78] Z. Zhijun, L. Wenpei, F. Pengxian ja Z. Ning, Experimental Study on the Impermeability of Concrete Construction Joints with Different Geometric Shapes, The Open Civil Engineering Journal, nro 7, 2013, pp. 109-115.
- [79] M. Zhiming, J. Zuquan, Z. Tiejun ja C. Yuanchao, Evaluation of High-Temperature Behavior of Sacrificial Concrete in Nuclear Reactor Core Containment Structures, ACI Materials Journal, osa/vuosik. 114, nro 6, 2017, pp. 829-838.
- [80] M. Pentti, J. Lahdensivu, A. Köliö, T. Pakkala ja J. Mattila, by 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016, Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry, 2016.